ANTT – Agência Nacional de transportes Terrestres

RDT – Recurso de Desenvolvimento Tecnológico

RELATÓRIO FINAL

ESTUDO DE COMPÓSITOS DE CIMENTO, EMULSÃO COM FRESADO ASFÁLTICO E AGREGADOS VIRGENS PARA BASES DE ELEVADO DESEMPENHO

Concessionária de Rodovias do Sul S/A – ECOSUL

31/12/2024

SUMÁRIO

1. DESCRIÇÃO DO PROJETO 17

1.1 TÍTULO 17

1.1.1 Linha de Inovação e Desenvolvimento 17

1.1.2 Temas 17

1.1 Resumo 17

1.2 OBJETIVOS 18

1.2.1 Objetivo Geral 18

1.2.2 Objetivos Específicos 19

1.3 JUSTIFICATIVA 21

1.4 DESENVOLVIMENTO DO PROJETO 25

1.4.1 Métodos e Técnicas utilizadas 25

1.5 ENTIDADE E EQUIPE EXECUTORA 29

1.5.1 Identificação da Entidade 29

1.5.2 Identificação da equipe executora 29

2. PRIMEIRO SEMESTRE DO PROJETO 31

2.1 Resumo 31

2.2 Atividades Previstas para o Período 31

2.3 Atividades Executadas para o Período 31

2.4 Justificativas 32

2.5 Descrição das Atividades Desenvolvidas 32

2.5.1 Introdução a BSM e seus principais aspectos 32

2.5.1.1 Bitumen Stabilization Materials 34

2.5.1.2 Classificação de Projeto 36

2.5.1.3 Dosagem 37

2.5.1.3.1 Considerações para o projeto de dosagem 38

2.5.1.3.2 Materiais empregados 39
2.5.1.3.3 Projeto de Mistura: Procedimentos 42
2.5.2 Etapa de Laboratório 47
2.5.3 Etapa de campo 84
2.5.4 Iniciação Científica e Artigos 105
2.6 Quadro Resumo – Atividades Previstas X Desenvolvidas 105
2.7 Atividades Previstas para o Próximo Período (01/06/2023 a 30/11/2023) 106
3.1 RESUMO 107
3.2 ATIVIDADES PREVISTAS PARA O PERÍODO 107
3.3 ATIVIDADES EXECUTADAS PARA O PERÍODO 107
3.4 JUSTIFICATIVAS 108
3.5 DESCRIÇÃO DAS ATIVIDADES DESENVOLVIDAS 108
3.5.1 Etapa de Laboratório 108
3.5.1.1 Avaliação do tempo de cura da mistura RAP+AV+CP+EM com emulsão EARP. 109
3.5.1.2 Avaliação do teor de filler 113
3.5.1.3 Ensaio de Módulo Dinâmico da mistura RAP+AV+CP+EM 115
3.5.1.4 Ensaio de Lottman para avaliação do efeito deletério da água 120
3.5.1.5 Ensaios de resistência monotônica por compressão uniaxial e tração direta na mistura (RAP+AV+CP+EM). 123
3.5.2 Etapa de Campo 130
3.5.2.1 Acompanhamento da evolução das condições de deformabilidade através do uso de ensaios deflectométricos com FWD em campanhas trimestrais 130
3.5.2.2 Realização de poços de sondagem no início do projeto 131
3.5.2.3 Avaliação das condições de superfície através de levantamento objetivo de defeitos 140
3.5.2.4 Avaliação Pista experimental “F” LAPAV/UFRGS 151
3.5.3 Análise De Dados 153

3.5.3.1 Estudo dos critérios de ruptura de ambos os materiais em avaliação (base negra & RAP+AV+CP+EM) através dos parâmetros da superfície de Mohr e/ou Drucker-Prager. 153

3.5.3.2 Curvas de acompanhamento de previsão de desempenho dos materiais em estudo com modelos de previsão de desempenho compatíveis 157

3.5.4 Participação em congressos e eventos 159

3.5.4.1 Enacor e 48° RAPv 159

3.5.4.2 Workshop de Engenharia e Operação Viária de Pelotas 161

3.5.4.3 XIII Workshop RDT - Recursos para Desenvolvimento Tecnológico 162

3.6 Quadro Resumo – Atividades Previstas x Desenvolvidas 163

3.7 Atividades Previstas para o Próximo Período (01/01/2024 a 30/06/2024) 164

4.1 Resumo 165

4.2 Atividades previstas para o período 165

4.3 Atividades executadas no período 165

4.4 Justificativas 166

4.5 Descrição das atividades desenvolvidas 166

4.5.1 Etapa de Campo 166

4.5.1.1 Acompanhamento da evolução das condições de deformabilidade através do uso de ensaios deflectométricos com FWD em campanhas trimestrais 167

4.5.1.2 Intervenção BR 116/RS km 495 170

4.5.1.3 Realização de poço de sondagem 173

4.5.1.4 Avaliação das condições de superfície através de levantamento objetivo de defeitos 179

4.5.1.5 Avaliação dos resultados dos levantamentos visuais 190

4.5.1.6 Avaliação Pista Experimental “F” LAPAV/UFRGS 191

4.5.2 ANÁLISE DE DADOS 201

4.5.2.1 Retroanálise da situação de campo para os quatro trechos em avaliação, com uso da ferramenta BAKFAA ou BackAnalysis da AASHTO, ou BackMeDiNa 202

4.5.2.2 Avaliação da não-linearidade a partir dos dados deflectométricos de múltiplas cargas 221

4.5.2.3 Estimativa de emissões por meio de Análise de Ciclo de Vida – ACV 237

4.5.3 ELBABORAÇÃO DE MINUTA DE NORMA 256

4.5.3.1 Normas nacionais e internacionais sobre Materiais estabilizados 256

4.5.3.2 Parâmetros de avaliação de misturas 260

4.5.4 WORKSHOP 261

4.5.5 PARTICIPAÇÃO EM CONGRESSOS E EVENTOS 261

4.6 Quadro Resumo – Atividades Previstas x Desenvolvidas 263

4.7 Atividades Previstas para o Próximo Período (01/07/2024 a 31/12/2024) 263

5. QUARTO SEMESTRE DO PROJETO 265

5.1 Resumo 265

5.2 Atividades previstas para o período 265

5.3 ATIVIDADES EXECUTADAS NO PERÍODO 265

5.4 Justificativas 266

5.5 Descrição das Atividades Desenvolvidas 266

5.5.1 Etapa de análise de dados 266

5.5.1.1 Análise integrada rigidez & resistência da mistura tipo base negra & mistura com RAP+AV+CP+EM com análises mecanística não-lineares (AEMC e/ou software de FEM(e.g. EverFE)).266

5.5.1.2 Avaliação da variação sazonal a partir dos dados deflectométricas trimestrais 282

5.5.1.3 Curvas de acompanhamento de previsão de desempenho dos materiais em estudo com modelos de previsão de desempenho compatíveis. 289

5.5.2 Workshop de Divulgação 296

5.5.3 Minuta de Norma 301

5.5.4 Participação em Eventos 302

5.6 Quadro Resumo – Atividades Previstas x Desenvolvidas 306

6. CONCLUSÕES, CONSIDERAÇÕES FINAIS E PRODUTOS GERADOS.....307

7. REFERÊNCIAS 311

8. ANEXOS 315

ANEXO I.....316

ANEXO II 318

ANEXO III 320

ANEXO IV 332

ANEXO V 344

ANEXO VI.....351

ANEXO VII.....353

ANEXO VIII 369

ANEXO IX.....372

ANEXO X 376

ANEXO XI.....379

ANEXO XII.....392

ANEXO XIII 405

ANEXO XIV 422

ANEXO XV 428

ANEXO XVI.....453

ANEXO XVII.....471

ANEXO XVIII 493

ANEXO XIX.....504

ANEXO XX 517

ANEXO XXI.....525

ANEXO XXII.....538

ANEXO XXIII 548

ANEXO XXIV 554

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Etapas esquemáticas do objetivo geral da pesquisa 20
Figura 2: Localização dos trechos existentes a serem monitorados + novo trecho a ser construído pela concessionária 28
Figura 3: Comportamento de materiais utilizados na pavimentação 36
Figura 4: Procedimento de dosagem BSM - procedimento TG2 37
Figura 5: Seleção Teor de Emulsão Residual 45
Figura 6: Composição granulométrica de projeto - BSM-RM-E 49
Figura 7: Curva de Compactação - BSM-RM-E 50
Figura 8: Granulometrias materiais 51
Figura 9: Composição granulométrica fresado disponível - BSM-RM-E 52
Figura 10: Características técnicas e representação compactador vibratório 53
Figura 11: Mistura após adição da emulsão - BSM-RM-E 54
Figura 12: Procedimento de cura CP's - BSM-RM-E 55
Figura 13: Rompimento ITS - BSM - RM-E 56
Figura 14: Cura úmida por submersão - BSM-RM-E 57
Figura 15: Resultados ITS - Compactação vibratório - BSM-RM-E 58
Figura 16: Compactador Giratório 58
Figura 17: Resultados ITS - compactação giratório - BSM-RM-E 59
Figura 18: Composição granulométrica de projeto - BSM-RM-nE 61
Figura 19: Curva de Compactação - BSM-RM-nE 61
Figura 20: Granulometria individual dos materiais - BSM-RM-nE 62
Figura 21: Faixa de trabalho com fresado disponível em laboratório 63
Figura 22: CP após cura em estufa - com frações maiores - BSM-RM-nE 64
Figura 23: Mistura após adição da emulsão - BSM-RM-nE 66
Figura 24: Etapas pós moldagem - BSM-RM-nE 66
Figura 25: Resultado ITS - Compactação vibratório - BSM-RM-nE 67
Figura 26: Ensaios de Azul de Metileno para a fração fina dos agregados virgens 69
Figura 27: Resultado ensaio de adesividade - Emulsão RM-2C - NBR 6300:2009 72
Figura 28: Resultado ensaio de adesividade - Emulsão RM-2C - NBR 14249:2007 73
Figura 29: Resultado ensaio de adesividade - Emulsão RM-2C - ASTM D3625:2005 74

Figura 30: BSM-EARP-nE - após adição da emulsão para as taxas de 1,8% e 2,0% de emulsão residual 76
Figura 31: Etapas de desmoldagem, cura e rompimento - BSM-EARP-nE 77
Figura 32: Cura úmida BSM-EARP-nE 77
Figura 33: Resultados Medias ITS - BSM-EARP-nE 78
Figura 34: Resultados ITS - BSM-EARP-nE 79
Figura 35: Resultado ensaio de adesividade - Emulsão EARP - NBR 6300 81
Figura 36: Resultado ensaio de adesividade - Emulsão EARP - NBR 14249:2007 82
Figura 37: Resultado ensaio de adesividade - EARP - ASTM D3625:2005 83
Figura 38: Trecho BR-116/RS km 495 antes da intervenção 86
Figura 39: Usina se Solos SBS engenharia - Capão do Leão/RS 87
Figura 40: Etapas de usinagem BSM 87
Figura 41: Etapas de mistura BSM em usina 88
Figura 42: BSM usinada e transporte 88
Figura 43: Preparação caixa pista experimental BR-116/RS km 495 89
Figura 44: Execução Pista experimental BR-116/RS - km 495 90
Figura 45: Superfície BSM Após a compactação 90
Figura 46: BSM após 4 dias e revestimento finalizado 91
Figura 47: Distribuição granulométrica BSM aplicada BR-116/RS km 495 92
Figura 48: Ensaio de frasco de areia 93
Figura 49: Camadas Pista F 94
Figura 50: Descarregamento e homogeneização da BSM - Pista F 95
Figura 51: Espalhamento e nivelamento da BSM 95
Figura 52: Compactação BSM - Pista F 96
Figura 53: Pista F um dia após a execução da camada de BSM 96
Figura 54: Pista F finalizada e sinalizada 97
Figura 55: Ensaio de densidade *in situ* - pista F 98
Figura 56: Análise granulométrica BSM-EARP-nE vs executado Pista F 99
Figura 57: ITS material Usinado - Pista F 100
Figura 58: Monitoramento LWD junho 2023 - km 417+400 ao km 417+600 101
Figura 59: Monitoramento LWD junho 2023 BR-116/RS- km 495+360 ao km 495+520 102
Figura 60: Monitoramento LWD junho 2023 BR-116/RS - km 506+000 ao 507+000 103

Figura 61: Monitoramento LWD junho 2023 BR-392/RS - km 175+400 ao 175+600....104
Figura 62: Corpos de prova Rompimento 60 dias....110
Figura 63: Avaliação tempo e tipos de cura - BSM-EARP-nE....111
Figura 64: Avalição da perda de água para cura ao ar....112
Figura 65: Avaliação do teor de cimento - BSM-EARP-nE....114
Figura 66: a) Mistura com teor 0% e b) Mistura com teor 1%....115
Figura 67: Corpos de prova modulo dinâmico capeados....116
Figura 68: Ensaio de Modulo Dinâmico....117
Figura 69: Propriedades Base Negra sem RAP....118
Figura 70: CP Base negra desmoldagem após compactação....119
Figura 71: a) CP base negra após 24 horas dentro do molde. b) Base negra após 24horas dentro do molde e envolto em plástico filme....120
Figura 72: Resultados gráficos Lottman....122
Figura 73: CP 150x300 triaxial monotônico....124
Figura 74: Montagem CP para o ensaio de triaxial monotônico....125
Figura 75: Execução do ensaio de triaxial monotônico....126
Figura 76: Antes, durante e depois triaxial monotônico....127
Figura 77: CP's após ensaio triaxial monotônico....128
Figura 78: Serragem e superfícies CP's FTD....129
Figura 79: Colagem CP's FTD....129
Figura 80: Local da inspeção – BR 116/RS km 495+420....132
Figura 81: Realização da sondagem BR 116/RS km 495+420....133
Figura 82: Camadas de revestimento e BSM BR 116/RS km 495+420....134
Figura 83: Extração Corpos de prova com sonda rotativa BR 116/RS km 495....135
Figura 84: Fechamento da valeta BR 116/RS km 495....135
Figura 85: Poço de sondagem BR 116/RS km 417....136
Figura 86: Poço de inspeção BR 116/RS km 417....137
Figura 87: Abertura do Poço de inspeção BR 116/RS km 506....138
Figura 88: Camadas do pavimento BR 116/RS km 506....138
Figura 89: Abertura Poço de inspeção km174 BR 392/RS....139
Figura 90: Camadas revestimento BR 392/RS km 174....140
Figura 91: Mapeamento fissuras julho 2023....141
Figura 92: Patologias km 495 BR 116/RS....142

Figura 93: Patologias em agosto de 2023 BR 116/RS km 495.....142
Figura 94: Patologias km 495 BR 116/RS dezembro 2023.....143
Figura 95: Levantamento julho 2023 km 417 BR 116/RS.....144
Figura 96: Levantamento km 417 BR 116/RS 145
Figura 97: Afundamento de trilha de roda BR 116/RS km 506 146
Figura 98: Local poço de inspeção BR 116/RS km 506.....147
Figura 99: Patologias encontradas BR 116/RS km 506.....148
Figura 100: Trecho avaliado BR 392 km 174.....149
Figura 101: BR 392/RS km 174 avaliação próximo aos taludes em corte.....150
Figura 102: Faixas BR 392/RS km 174.....151
Figura 103: Ensaios de Acompanhamento Pista experimental "F" LAPAV/UFRGS....152
Figura 104: Trajetória de tensões base negra 154
Figura 105: Trajetória das tensões BSM 155
Figura 106: Curva Mestra Módulo Dinâmico 158
Figura 107: Curva Mestra BSM x Curva mestra misturas Asfálticas.....159
Figura 108: Apresentação Artigo 25° ENACOR e 48° RAPv.....160
Figura 109: Equipe do LAPAV 25° ENACOR e 48° RAPv 160
Figura 110: Participação no 1° Workshop de Engenharia e Operação Viária de Pelotas 161
Figura 111: Apresentação no 1° Workshop de Engenharia e Operação Viária de Pelotas 162
Figura 112: Estande XIII WORKSHOP RDT 163
Figura 113: Execução FWD BR 116/RS km 506.....168
Figura 114: Execução FWD BR 392/RS km 174.....168
Figura 115: Execução FWD BR 116/RS km 417.....169
Figura 116: Execução FWD BR 116/RS km 495.....169
Figura 117: Estada do Revestimento antes da fresagem.....170
Figura 118: Fresagem Intervenção km 495 BR116/RS 171
Figura 119: Topo da Camada de BSM.....171
Figura 120: Pintura de ligação sobre BSM 172
Figura 121: Execução do Revestimento.....172
Figura 122: Abertura da trincheira BR 116/RS km 495 – fresa camada de base.....174
Figura 123: Abertura da trincheira BR 116/RS km 495 – escavação 175

Figura 124: Material de Subleito trecho experimental 176
Figura 125: Estrutura do pavimento - BR116/RS km 495 177
Figura 126: Perfil do pavimento - BR116/RS km 495 177
Figura 127: Perfil acostamento BR 116/RS km 495 178
Figura 128: Levantamento visual janeiro de 2024 BR116/RS km 495 179
Figura 129: Levantamento afundamento de trilha de roda com treliça 180
Figura 130: Levantamento visual junho de 2024 BR116/RS km 495 182
Figura 131: Levantamento visual km 417 BR 116/RS 184
Figura 132: Levantamento janeiro 2024 km 417 BR 116/RS 185
Figura 133: Afundamento de trilha de roda BR 116/RS km 506 186
Figura 134: Intervenção de pavimento BR 116 KM 506 janeiro de 2024 186
Figura 135: Levantamento julho 2024 BR 116/RS km 506 187
Figura 136: Trecho avaliado BR 392 km 174 188
Figura 137: Faixas BR 392/RS km 174 189
Figura 138: Levantamento trilha de roda Km 174 BR 392/RS 190
Figura 139: Ensaios de Acompanhamento Pista experimental "F" LAPAV/UFRGS 192
Figura 140: Estrutura Pista "F" 193
Figura 141: Aplicação de Carga Simulador de Tráfego - Pista F 194
Figura 142: Perfilógrafo leituras ATR 195
Figura 143: Evolução do ATR - Pista F trilha Bento 196
Figura 144: Evolução do ATR - Pista F trilha Bento – conversão para eixo padrão 197
Figura 145: Evolução das deflexões D0 Pista F trilha Bento 198
Figura 146: Evolução das deflexões D0 pista F trilha bento eixo padrão 8,2tf 198
Figura 147: Evolução dos ensaios Pista F trilha bento 199
Figura 148: Evolução dos ensaios Pista F trilha bento – continuação 200
Figura 149: Evolução do ATR seção 4 pista F trilha Bento 201
Figura 150: Camadas do pavimento - BR 116/RS km 417 204
Figura 151: Variação do Módulo de Resiliência retroanálisados Base estabilizada - 40kN BR-116/RS - Crescente 207
Figura 152: Variação do Módulo de Resiliência retroanálisados Base estabilizada - 40kN BR-116/RS - decrescente 209
Figura 153: Estrutura do pavimento - BR 116/RS km 506 212

Figura 154: Variação do Módulo de Resiliência retroanálisados BSM - 40kN BR-116/RS km 506.....214
Figura 155: Estrutura do Pavimento – BR-392/RS km 174 216
Figura 156: Variação do Módulo de Resiliência retroanálisados Base estabilizada - 40kN BR392/RS km 174.....218
Figura 157: Estrutura do pavimento - BR 116/RS km 495.....219
Figura 158: Variação do Módulo de Resiliência BSM - BR 116/RS km 495.....221
Figura 159: Módulo de resiliência - junho/23 - BR-116/RS km 417 crescente.....222
Figura 160: Módulo de resiliência - outubro/23 - BR-116/RS km 417 crescente.....223
Figura 161: Módulo de resiliência - janeiro/24 - BR-116/RS km 417 crescente.....223
Figura 162: Módulo de resiliência - abril/24 - BR-116/RS km 417 crescente.....224
Figura 163: Módulo de resiliência - junho/23 - BR-116/RS km 417 decrescente.....226
Figura 164: Módulo de resiliência – outubro/23 - BR-116/RS km 417 decrescente 226
Figura 165: Módulo de resiliência - janeiro/24 - BR-116/RS km 417 decrescente.....227
Figura 166: Módulo de resiliência - abril/24 - BR-116/RS km 417 decrescente.....227
Figura 167: Módulo de resiliência - junho/23 - BR-392/RS km 174 decrescente.....229
Figura 168: Módulo de resiliência – outubro/23 - BR-392/RS km 174 decrescente 229
Figura 169: Módulo de resiliência - janeiro/24 - BR-392/RS km 174 decrescente 230
Figura 170: Módulo de resiliência - abril/24 - BR-392/RS km 174 decrescente 230
Figura 171: Módulo de resiliência – junho/23 - BR-116/RS km 506.....232
Figura 172: Módulo de resiliência – outubro/23 - BR-116/RS km 506 232
Figura 173: Módulo de resiliência – janeiro/24 - BR-116/RS km 506.....233
Figura 174: Módulo de resiliência – abril/24 - BR-116/RS km 506.....233
Figura 175: Módulo de resiliência – outubro/23 - BR-116/RS km 495 235
Figura 176: Módulo de resiliência – janeiro/24 - BR-116/RS km 495.....236
Figura 177: Módulo de resiliência – abril/24 - BR-116/RS km 495.....236
Figura 178: Módulos de análise da ISO 21930 (ISO, 2017) e BS EN 15804:2012 + A2:2019 (CEN, 2022).....239
Figura 179: Ciclo de vida de um pavimento e módulos de análise 239
Figura 180: Esquema dos fluxos de produção da BSM 240
Figura 181 – Impactos por módulo de análise – ReCiPe Midpoint (I). 251
Figura 182 – Fluxograma de impacto nas mudanças climáticas......252
Figura 183 – Fluxograma de impactos totais na análise de *endpoint*......254

Figura 184: Parâmetros utilizados por BSM's.....260
Figura 185: Apresentação do Artigo - CILA.....262
Figura 186: Variação de N para as variações de módulos 271
Figura 187: Pontos de avaliação na seção crítica.....273
Figura 188: Tensão Principal S1 considerando 2,7t e 4,2t para os módulos retroanálisados 275
Figura 189: Tensão principal S1 considerando 5,2 e 7,2t para os módulos retroanálisados 276
Figura 190: Simulação das tensões principais S1 e S3 com módulos de laboratório 277
Figura 191: Tensão principal S3 considerando 2,7t e 4,0t para os módulos retroanálisados 278
Figura 192: Tensão principal S3 considerando 5,2 e 7,2t para os módulos retroanálisados 279
Figura 193: Deslocamentos Uz para a seção crítica para módulos retroanálisados para cargas de 2,7t e 4,2t.....280
Figura 194: Deslocamentos Uz para a seção crítica e módulos retroanálisados para cargas 5,4 e 7,2t.....281
Figura 195: Deslocamentos UZ para a seção crítica considerando módulos de laboratório 282
Figura 196: Resultado SSR Temperatura Alta 291
Figura 197: Resultado SSR Temperatura Baixa.....292
Figura 198: Curva C versus S - ensaio FTD 294
Figura 199: Curva de desempenho Deformação permanente.....296
Figura 200: Apresentação 26° Encontro do Asfalto 298
Figura 201: Apresentação 3° SIREMA Prof. Lélio Brito.....299
Figura 202: Apresentação 3° SIREMA Prof. Andrea Grilli 300
Figura 203: Apresentação Igor 49° RAPv 303
Figura 204: Apresentação 49° RAPV prof. Washington Peres Núñez.....304
Figura 205: Apresentação trabalho 38° ANPET Prof. Lélio Brito.....305

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Características das emulsões asfálticas para serviços de reciclagem de revestimento, reciclagem profunda e estabilização de solos 41
Tabela 2: Faixas granulométricas recomendadas para BSM 43
Tabela 3: Valores referência para dosagem BSM 46
Tabela 4:Características RM-2C 53
Tabela 5: Resultado Ensaio azul de metileno para a fração fina dos agregados virgens 69
Tabela 6: Características emulsão EARP 75
Tabela 7: Deflexões trecho experimental BR-116/RS - antes intervenção 85
Tabela 8: Níveis de Carga FWD 105
Tabela 9: Número de ciclos para cada frequência de teste 116
Tabela 10: Propriedades e identificação CP's Lottman 121
Tabela 11: Resultados Ensaio de Lottman 122
Tabela 12: Parâmetros triaxial monotônico Base Negra 153
Tabela 13: Parâmetros de referência triaxial 154
Tabela 14: Parâmetros triaxial monotônico BSM 156
Tabela 15: Resultados Obtidos no ensaio de modulo dinâmico 157
Tabela 16: Resultados CP's 01 e 03 158
Tabela 17: Resultado IGG Jan/24 - BR-116/RS km 495 181
Tabela 18: Resultado IGG Jun/24 - BR-116/RS km 495 183
Tabela 19: Resultados Históricos de retroanálises BR 116/RS km 417 – Pista Sul 203
Tabela 20: Resultados Históricos BR 116/RS km 147 Pista Norte 203
Tabela 21: Média de Módulos Retroanálisados BR-116/RS km 417 pista Sul 205
Tabela 22: Média de Módulos Retroanalisádos BR 116/RS km 417 pista Norte 208
Tabela 23: Resultados de Módulos de resiliência Históricos BR 116/RS km 506 211
Tabela 24: Média de Módulos Retroanalisádos BR 116/RS km 506 Pista Sul 213
Tabela 25: Resultados de Módulos de resiliência Históricos BR 392/RS km 174 215
Tabela 26: Média de Módulos Retroanálisados BR 392/RS km 174 Pista norte 217
Tabela 27: Média de Módulos Retroanálisados BR 116/RS km 495 220
Tabela 28: Módulos Retroanálisados fevereiro 2023 - BR116/RS km 495 220
Tabela 29: Valores mínimo, médio e máximo de triaxial monotônico 234
Tabela 30: Descrição dos fluxos de produção da BSM 241

Tabela 31: Composição emulsão asfáltica 243
Tabela 32: Traço da BSM 243
Tabela 33: Gasto energético da mistura da BSM 244
Tabela 34: Gasto energético para Fresagem contínua de revestimento asfáltico 246
Tabela 35 – Gasto energético para mistura da emulsão asfáltica. 248
Tabela 36 – Impactos por categoria – ReCiPe Midpoint (I). 249
Tabela 37 – Impactos por módulo de análise – ReCiPe Midpoint (I). 250
Tabela 38 – Impactos por categoria – ReCiPe Endpoint (E, A). 253
Tabela 39: Composição granulométrica 259
Tabela 40: Coeficiente de confiabilidade associado a categoria de estrada 267
Tabela 41: Dados de MR retroanálisados para 2,7t e 4,1t 269
Tabela 42: Dados de MR retroanálisados para 5,4t e 7,2t 269
Tabela 43: Dados material avaliado 269
Tabela 44: Pontos de análise 272
Tabela 45: Características amostras SSR 291
Tabela 46: Resumo S-VECD Fadiga BSM-EARP-nE 295
Tabela 47: Produtos Gerados pelo RDT ECOSUL 309
Tabela 48: Identificação dos elementos no relatório 310

1. DESCRIÇÃO DO PROJETO

1.1 TÍTULO

O presente projeto de pesquisa intitula-se “Estudo de Compósitos de Cimento, Emulsão com Fresado Asfáltico e Agregados Virgens para Bases de Elevado Desempenho”.

1.1.1 Linha de Inovação e Desenvolvimento

Conforme artigo 3º da Resolução ANTT 483/2004, alterado pela Resolução ANTT 5.172/2016, este projeto de pesquisa se insere nas seguintes linhas de inovação e desenvolvimento:
I. Métodos e técnicas construtivas;
II. Tecnologia básica e aplicada;
III. Soluções técnicas para problemas específicos.

1.1.2 Temas

Sustentabilidade em pavimentos; uso de bases estabilizadas; comportamento de pavimentos em serviço; viscoelasticidade de misturas asfálticas com RAP; simulação em pistas de verdadeira grandeza.

1.1 Resumo

A demanda por pavimentos mais duráveis vem nos dias de hoje associada à demanda pela redução de materiais virgens e menores consumos energéticos. No Brasil, o crescimento da infraestrutura vem na esteira da otimização dos recursos naturais acompanhando a evolução das metodologias de dimensionamento empírico-mecanísticas que hoje permitem o uso de materiais “não tradicionais”,

antes freados pela dificuldade de sua qualificação no âmbito do chamado “Método de Dimensionamento do CBR” que vem fazendo sua transição para o atual “MeDiNa” em análise pelo DNIT. Material de emprego vasto internacionalmente e até mesmo explorado em outros países da América Latina, no Brasil há uma carência de especificação e conhecimento dos parâmetros de projetos para misturas estabilizadas com asfalto. Esta pesquisa teve como principal objetivo avançar no conhecimento do comportamento em laboratório e do desempenho em campo de misturas produzidas com fresado asfáltico, agregados virgens, emulsão e cimento para aumento da sustentabilidade de rodovias através da otimização do uso de recursos naturais e disseminação do conhecimento destas inovadoras técnicas à comunidade técnica-cientifica regional. Para tanto, foram determinadas propriedades mecânicas em laboratório e campo de dois tipos principais de aplicação inovadoras em camadas de base de pavimento: RAP (*Reclaimed Asphalt Pavement*, ou material fresado) com emulsão e cimento Portland & base negra e também investigada a redução de carbono gerada pela transição de técnicas tradicionais de pavimentação rumo ao reuso do RAP nas camadas de base estabilizadas. A pesquisa foi desenvolvida em três etapas principais: a) uma fase de laboratório; b) uma de acompanhamento de trechos em serviço que se desenvolverá com duas tarefas distintas: b1) acompanhamento de trechos em serviço da Ecosul e (b2) construção de uma pista para simulação em verdadeira grandeza para associação ao plano de simulações previsto no projeto da Rede de Tecnologia de Asfalto em desenvolvimento pelo LAPAV-Petrobras-ANP. O projeto proporcionou múltiplos benefícios às bases técnico-científicas de dosagem de camadas estabilizadas com adição de material reciclado.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

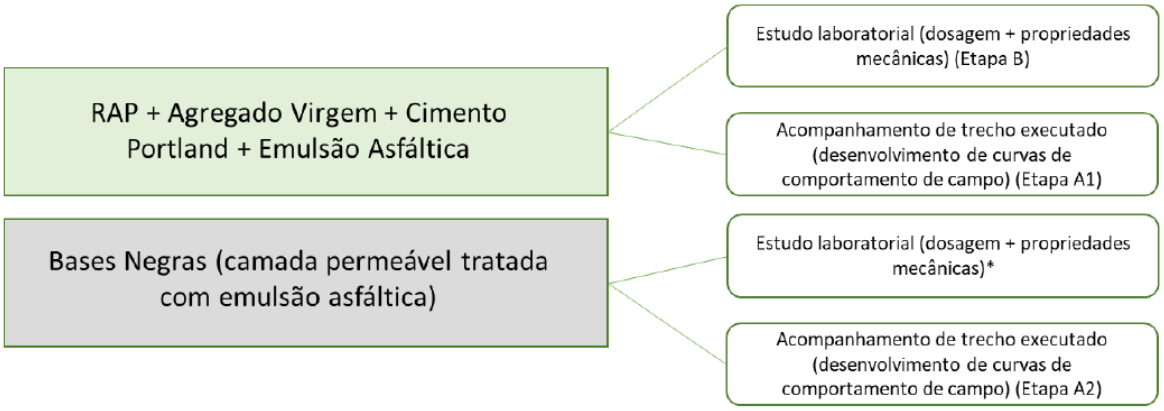
O objetivo geral desta pesquisa foi avançar no conhecimento do comportamento em laboratório e do desempenho em campo de misturas produzidas com fresado asfáltico, agregados virgens, emulsão e cimento para aumento da sustentabilidade de rodovias através da otimização do uso de recursos naturais e disseminação do conhecimento destas inovadoras técnicas à comunidade técnica-cientifica regional. Para tanto, foram determinadas propriedades mecânicas em laboratório e campo, de dois tipos principais de aplicação inovadoras em camadas de base de pavimento: RAP

(*Reclaimed Asphalt Pavement*, ou material fresado) com emulsão e cimento Portland & base negra. No âmbito técnico-científico, o estudo foi desenvolvido com o objetivo de fornecer bases para o avanço no dimensionamento dessas estruturas, por meio do monitoramento de seções experimentais que permitissem parametrizar o seu comportamento e aprimorar a previsão de seu desempenho, visando ao dimensionamento adequado das mesmas. No âmbito científico-acadêmico, algumas perguntas fundamentais sobre o mecanismo de funcionamento foram objetos de investigação, tais como: a ação de aglutinação do cimento é suficiente para modificar o comportamento mecânico destes materiais, ou sua ação é mais fortemente explicada como filler? Qual seria o teor de cimento necessário para iniciar a contribuição mecânica por aglutinação? Se sua ação for apenas como filler, poderia ser substituído por cinza ou cal?

1.2.2 Objetivos Específicos

Para alcançar o objetivo geral, a pesquisa teve dois focos principais, conforme detalhado na Figura 1 O primeiro (A) foi o acompanhamento de trechos em serviço executados com uso de duas inovadoras técnicas de pavimentação, capazes de promover o aumento da sustentabilidade de pavimentos rodoviários para viabilização da análise preditiva do seu comportamento: (A1) dois trechos executado com camada de agregado virgem + RAP + cimento Portland + emulsão asfáltica, um no km 174 da BR-392 e outro no km 417 da BR-116; outro trecho (A2) executado com base asfáltica (agregado virgem em granulometria descontínua com emulsão asfáltica), já objeto de investigação laboratorial em RDT anterior para avaliação da dosagem e características mecânicas do material. A segunda etapa (B) consistiu em uma fase laboratorial para a investigação e otimização da mistura de RAP + agregado virgem + cimento Portland + emulsão asfáltica.

Figura 1: Etapas esquemáticas do objetivo geral da pesquisa



* Estudo já realizado em RDT anterior LAPAV/Ecosul (2018-2020). Estudo intitulado *"Avaliação do comportamento mecânico de misturas asfálticas com ligante modificado por borracha, usinadas a temperaturas intermediárias, e de bases negras usinadas com emulsão asfáltica."*

Os objetivos específicos estabelecidos para esta pesquisa foram os seguintes:

1. Estudo da resistência ao cisalhamento e da deformabilidade em compressão triaxial de misturas com emulsão e cimento, em amostras cilíndricas de tamanho convencional (30 cm x 15 cm), com a finalidade de delimitar os principais mecanismos de falha dos materiais aplicados na pesquisa.
2. Analisar o efeito do fresado asfáltico e da emulsão no comportamento viscoelástico das misturas, com obtenção de curvas-mestras, de forma a viabilizar a modelagem do comportamento dos trechos em serviço e correlacionar as propriedades de laboratório com as observações de campo.
3. Monitorar, através de levantamentos defletométricos, de irregularidade longitudinal e afundamentos nas trilhas de roda, bem como de condição superficial, o desempenho de pavimentos dos trechos executados com misturas produzidas com fresado, agregados virgens, emulsão e cimento.
4. Delimitar os modelos de previsão de desempenho que se melhor se adaptem à modelagem dos pavimentos compostos por camadas estabilizadas de maneira a permitir adequado dimensionamento e acompanhamento da vida útil destas estruturas.
5. Realizar uma análise do potencial de sustentabilidade associado ao uso de ambas as técnicas, considerando aspectos sociais, econômicos e ambientais, por meio de análise do custo do ciclo de vida (LCCA - Life Cycle Cost Analysis).

6. Acompanhar a simulação em uma pista de verdadeira grandeza com uso do Simulador de Tráfego LAPAV/UFRGS numa cooperação com a Rede Temática de Tecnologia em Asfaltos (RTA) em parceria com a Petrobras; a este projeto não haverá qualquer alocação de custos com relação a esta atividade já que ocorrerá no escopo da RTA-Petrobras. Dado a relevância da calibração do material estudado nesta pesquisa em consonância com as demais envolvidas na RTA, a Petrobras aceitou compartilhar os dados que permitirá ampliar o conhecimento do material na escala de verdadeira grandeza.
7. Elaborar minuta de norma técnica para bases de elevado módulo a partir da experiência adquirida no RDT LAPAV/ECOSUL (2022-2024) e no desenvolvimento do escopo do presente trabalho, com misturas de RAP + agregado virgem + cimento Portland + emulsão asfáltica.
8. Promover um workshop regional para disseminação da técnica, suas características e benefícios com o objetivo de divulgar o conteúdo da pesquisa, as vantagens no uso de materiais reciclados divulgando à comunidade técnico científica (prefeitura, DAER, Universidades, consultores).

1.3 JUSTIFICATIVA

O desenvolvimento econômico que o país experimentou no decênio compreendido entre 2005 e 2014 aumentou de forma significativa o transporte de cargas pelo meio rodoviário. Tal crescimento ocorreu com pontuais avaliações dos aspectos de sustentabilidade das técnicas empregadas, seja pelo uso de materiais de fontes alternativas e/ou reciclados, por maior longevidade das técnicas, melhor gerenciamento da aplicação ou impacto a sociedade de forma geral.

Em resposta ao aumento das solicitações, em número e magnitude, a estrutura de parte dos pavimentos nacionais apresenta baixa capacidade, havendo a necessidade de intervenções. Duas técnicas de crescente importância na restauração de pavimentos são: a) bases cimentadas, com incorporação de fresado asfáltico, novos agregados, emulsão asfáltica e cimento e b) a reciclagem profunda in situ com incorporação simultânea de emulsão asfáltica e cimento Portland.

O uso de tais técnicas resulta em camadas de materiais compósito formado por fresado asfáltico (comumente chamado de RAP, do inglês, *reclaimed asphalt pavement*), base granular, emulsão

asfáltica e cimento Portland. Quando o material compósito decorre da reciclagem é geralmente chamado de mistura reciclada a frio com emulsão (CBEM, *cold bituminous emulsion mixture)* ou mistura reciclada tratada com emulsão e cimento (CETM, *cement emulsion treated mixture*).

Desde a década de 1970, o conhecimento acerca de tais materiais evoluiu consideravelmente (Fang et al., 2016a), podendo-se destacar estudos sobre a influência de diferentes fatores (por exemplo, teores de cimento e emulsão, granulometria e cura) na compactabilidade (Grilli et al., 2012; Jenkins et al., 2012; Miljkovic et al., 2014a; Jenkins et al., 2016), na estabilidade (Garcia et al., 2013; Fang et al., 2016b), na resistência à compressão simples (Mallick et al., 2002a; Bessa et al., 2016), nas resistências à tração por compressão diametral (Mallick et al., 2002b; Niazi et al., 2009; Kavussi et al., 2010; Grilli et al., 2012; Xu et al., 2011; Miljkovic et al., 2014b; Miljkovic et al., 2014c; Dalla Rosa et al., 2015; Graziani et al., 2016; Ojum et al., 2016; Bessa et al., 2016; Miljkovic et al., 2017; Graziani et al., 2018; Raschia et al., 2019a; Raschia et al., 2019b; Gandi et al., 2019) e na flexão (Liebenberg et al., 2002; Mathaniya, 2006; Xu et al., 2011), nos módulos de resiliência na tração por compressão diametral (Mallick et al., 2002a; Niazi et al., 2009; Kavussi et al., 2010; Bocci et al., 2011; Modarres et al., 2011; Grilli et al., 2012; Graziani et al., 2016; Raschia et al., 2019a; Raschia et al., 2019b) e na flexão (Mathaniya, 2006) e na vida de fadiga determinada por ensaios de tração por compressão diametral (Bocci et al., 2011; Modarres et al., 2011; Bocci et al., 2012; Stimilli et al., 2013; Ojum et al., 2016) e de flexão (Mathaniya, 2006; Jenkins, 2012).

O material produzido com emulsão e cimento apresentará comportamento viscoelástico (embora não tão acentuado quanto aquele de misturas asfálticas) causado pela presença do ligante asfáltico residual (da emulsão e do fresado). Assim, o efeito da temperatura e da frequência de carregamento nas propriedades mecânicas também merece atenção (Bocci et al., 2012; Stimilli et al., 2013; Gondezoni et al., 2017; Gandi et al., 2017; Gandi et al., 2018; Graziani et al., 2109a; Graziani et al., 2109b; Kuchiishi et al., 2019b; Miljkovic et al., 2019). Destaca-se que, além dos estudos laboratoriais citados, existem aqueles que tratam do comportamento de tal material em serviço (Liebenberg et al., 2003a; Betti et al., 2015; Amarh et a., 2017; Gondezoni et al., 2017) e até um método para dimensionamento de pavimentos com camadas tratadas com cimento e emulsão foi apresentado (Liebenberg et al., 2003b), porém ainda carente de avaliações de campo para sua validação e, assim, sugestão de melhorias que possam ser incorporadas.

A quantidade de cimento adicionada às misturas com emulsão é geralmente baixa, não ocasionando grandes acréscimos de resistência e rigidez. Desta forma, o material com emulsão e cimento, assim

como materiais granulares, tende a ser dependente do estado de tensões ao qual é submetido. Estudos acerca da influência do estado de tensões na resistência ao cisalhamento (Long et al., 2004; Jenkins et al., 2007), no módulo de resiliência (Long et al., 2004; Jenkins et al., 2007; Dalla Rosa et al., 2015; Jenkins et al., 2016; Bessa et al., 2016; Kuchiishi et al., 2019a) e na deformação permanente (Jenkins et al., 2007; Stimilli et al., 2013) desses materiais foram realizados empregando-se equipamentos triaxiais de porte convencional (geralmente corpos de prova com 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura). Ainda assim, ressalta-se que um equipamento triaxial simplificado foi desenvolvido por Jenkins et al. (2012), visando a obtenção do comportamento desses materiais de uma forma mais prática.

Contudo, dadas as faixas granulométricas geralmente utilizadas e visto o controle do tamanho máximo dos agregados em reciclagens in situ é uma atividade complexa, por vezes são geradas grandes partículas de material fresado (aglomerações de agregados e ligante asfáltico). A presença de tais partículas influencia o comportamento do material reciclado, sendo assim, é necessária a avaliação dos tipos de ensaio e geometria de corpos-de-prova a serem considerados nos estudos.

Mesmo com os avanços significativos resultantes das pesquisas laboratoriais mencionadas, resta ainda a verificação do comportamento das misturas em campo, através de sistemático monitoramento de trechos experimentais. Este costuma ser o grande desafio na consolidação de métodos de dimensionamento mecanístico-empíricos (M-E) que, seguindo uma tendência universal iniciada nos anos 1980 e reforçada no presente século, ganham cada vez mais importância no contexto da pavimentação nacional. Exemplo do avanço das metodologias M-E é o MeDiNa – Método de Dimensionamento Nacional - em fase de implantação no país.

É justamente na obtenção de fatores laboratório-campo e na proposição de “linhas de tendência”, que futuramente constituirão modelos de previsão de desempenho de pavimentos (MPPD), que há necessidade de se avançar de forma a possibilitar o emprego com segurança de modelos M-E de dimensionamento obtidos a partir de pesquisas laboratoriais.

Visando o preenchimento dessas lacunas o presente Projeto de Pesquisa tem duas motivações: a) avançar no conhecimento do comportamento resistência-tensão-deformação e no comportamento à fadiga de compósitos incluindo fresado asfáltico, agregados novos, emulsão asfáltica e cimento e; b) monitorar a evolução da capacidade estrutural e da condição funcional de pavimentos com bases cimentadas construídas anteriormente e novas.

Em pesquisa realizada anteriormente a este projeto, através de uma parceria entre a Concessionária ECOSUL e o LAPAV/UFRGS, foi desenvolvida uma mistura de base negra que está sendo utilizada pela concessionária, com 4,5% de teor de asfalto e volume de vazios de 25,5%. Esta mistura foi reproduzida em laboratório pelo LAPAV, sendo possível realizar os ensaios de RICE, permeabilidade; ensaio triaxial de carga repetida, para obtenção de módulo de resiliência, e ensaio triaxial monotônico, para obtenção dos parâmetros de coesão e ângulo de atrito.

Os ensaios de módulo de resiliência, entre 500 e 800MPa, mostraram uma dependência em relação à tensão confinante dos materiais estabilizados com emulsão reproduzindo o comportamento clássico de agregados pétreos e materiais granulares em geral.

Foram obtidos elevados coeficientes de determinação e quando se compararam os resultados dos ensaios com resultados relatados na bibliografia sobre britas graduadas, observou-se que o tratamento com emulsão aumenta de forma significativa o valor de K_1 (multiplicados na frente do modelo) e diminui também de forma significativa o valor de K_2 (expoente que explicita a dependência do módulo em função do estado de tensões). Isto significa maiores módulos para qualquer estado de tensões. De fato, os módulos variaram entre 500 e 800 MPa, valores muito superiores aos normalmente obtidos em ensaios de britas graduadas simples - BGS (de 150 a 350 MPa).

O ensaio Triaxial monotônico, desta mistura, foi realizado para conhecimento do coeficiente de coesão (36kPa) e ângulo de atrito (48 graus). Estes valores são intermediários aos obtidos para materiais granulares e concreto asfálticos.

Os parâmetros de resistência ao cisalhamento da brita graduada ensaiada por Malysz (2004) c = 49 kPa e $\varphi = 60^o$ são superiores aos da base negra, o que se justifica pelo fato da primeira ter granulometria contínua que conduz a maior valor de intercepto coesivo (c) e não apresenta ligante em sua composição, o que não reduz o ângulo de atrito interno (φ).

O ângulo de atrito efetivo da base “negra” (aproximadamente 48º) superou ligeiramente os valores obtidos em concretos asfálticos, uma vez que na base tratada com emulsão as partículas de agregados estão mais em contato que nos concretos asfálticos.

O estudo de uma nova dosagem de base negra está sendo desenvolvido, pela Concessionária ECOSUL, com a utilização de material fresado proveniente da obra sob cuidados da empresa. Esta nova dosagem incorpora material fresado e cimento (1% e 2%) na base negra em uso pela empresa e utiliza como premissa os procedimentos e ensaios descritos no TG2 da África do Sul

possibilitando comparar e correlacionar com os resultados das bases asfálticas drenantes. O avanço desta vertente da pesquisa, que foi fruto de um processo de aprimoramento sugerido pelos pesquisadores do LAPAV no primeiro trabalho é o grande motivador desta continuação.

Por fim, importante dizer que o novo método brasileiro de dimensionamento de pavimentos asfálticos, de cunho mecanístico-empírico, vem sendo desenvolvido no âmbito da Rede Temática de Tecnologia em Asfaltos, numa parceria capitaneada pela PETROBRAS e que envolve diversas universidades nacionais, incluindo a UFRGS, através do Laboratório de Pavimentação (LAPAV). A partir de 2010, além de coordenarem a realização de um Programa Interlaboratorial (PIL), pesquisadores do LAPAV têm acompanhado a execução e a evolução de desempenho de quatro trechos experimentais. Nas ações da Rede Temática de Tecnologia em Asfaltos, a UFRGS tem contribuído com a geração de dados de caracterização de materiais e de desempenho de pavimentos a partir da construção e monitoramento de trechos experimentais em importantes rodovias federais, no RS. Neste espírito o presente projeto comporá em uma de suas partes, a construção de uma pista para simulação de tráfego em verdadeira grandeza numa pareceria com a RTA cujo projeto de pesquisa encontra-se em andamento no LAPAV, transformando a oportunidade de construção de uma pista adicional com o material reciclado com adição de emulsão e cimento uma oportunidade inovadora para calibração do desempenho deste material e inserção no banco de resultados tanto da ANTT-RDT quanto da RTA que já conta com vasto banco de dados e vem sendo usado para suporte às novas metodologias de dimensionamento nacionais.

1.4 DESENVOLVIMENTO DO PROJETO

1.4.1 Métodos e Técnicas utilizadas

A seguir são descritos os métodos de ensaio empregados na pesquisa. Os materiais e as características básicas de dosagem das misturas recicladas com emulsão e cimento estudadas foram fornecidos pela concessionária, visto que ela já havia utilizado esse tipo de mistura nos pavimentos sob sua administração. Os dados de levantamentos de campo para comparações com os resultados de laboratório também foram obtidos com atividade realizadas na pesquisa e parte fornecidos pela

concessionária, quando estavam no escopo das atividades de monitoração rotineira do compromisso com o poder concedente, quando então não gerarão ônus à pesquisa.

Etapa de Laboratório

- Foi validado a dosagem em laboratório da mistura de RAP do RDT anterior para RAP da pista experimental a ser construída + Agregado Virgem + Cimento Portland + Emulsão (RAP+AV+CP+EM) para determinação das características volumétricas do material e moldagem de amostras para estudos.
- Foi realizada a avaliação do tempo de cura das misturas RAP+AV+CP+EM
- Foram executados ensaios de Módulo Dinâmico da mistura RAP+AV+CP+EM e base negra para geração dos parâmetros viscoelásticos do material.
- Foram realizados ensaios de Hamburgo e/ou Lottman para avaliação do efeito deletério da água.
- Foram realizados ensaios de resistência monotônica por compressão uniaxial e tração direta na mistura (RAP+AV+CP+EM).

Etapa de Campo

Os trechos de campo acompanhados foram aqueles cuja técnica já foi aplicada pela concessionária; assim, sua construção não faz parte do escopo da pesquisa, mas tão somente o acompanhamento com dados históricos e coletados ao longo da pesquisa conforme técnicas abaixo:

- Foi realizado o Acompanhamento da evolução das condições de deformabilidade através do uso de ensaios deflectométricos com FWD em campanhas trimestrais (impacto da sazonalidade na deformabilidade dos materiais), com uso da técnica de múltiplos níveis de carga para avaliação da não-linearidade do comportamento dos materiais. [1]

[1] A concessionária realiza uma campanha anual com levantamento de FWD; apesar desta campanha não contemplar a realização de múltiplas cargas, ela será considerada para o acompanhamento e não gerará ônus à pesquisa. Desta forma, 3 campanhas das 4 anuais serão cobertas pela pesquisa, enquanto 1 será coberta nos custos usuais da concessionária.

- Foram realizados de poços de sondagem no início do projeto (verificação da estrutura, condições inicia dos materiais e análise visual dos materiais) e no fim do projeto (análise visual dos materiais e deformação acumulada no período por camada).
- Foram avaliadas as condições de superfície por meio de levantamentos objetivos de defeitos nos quatro trechos, realizados a cada semestre.
- Foi acompanhado a simulação de uma pista em verdadeira grandeza (seção de 3,5m x 20m de comprimento) na Área de Pesquisa e Testes de Pavimentos (LAPAV/UFRGS) para análise do desempenho até meio-milhão de repetição de eixos com material tipo RAP+AV+CP+EM – pista foi executada no âmbito do projeto RTA/Petrobras – LAPAV.

Análise de Dados

- Foi realizada a análise integrada rigidez & resistência da mistura tipo base negra & mistura com RAP+AV+CP+EM com análises mecanístico não-lineares (AEMC e/ou software de FEM(e.g. EverFE)).
- Foi conduzido um estudo dos critérios de ruptura de ambos os materiais em avaliação (base negra e RAP+AV+CP+EM) através dos parâmetros da superfície de Mohr e/ou Drucker-Prager.
- Foi realizada a retroanalise da situação de campo para os quatro trechos em avaliação, com usa da ferramenta BAKFAA ou BackAnalysis da AASHTO, ou Back MeDiNa.
- Foi avaliada a variação sazonal com base nos dados defletométricos trimestrais.
- Avaliação da não-linearidade a partir dos dados defletométricos de múltiplas cargas.
- Foram desenvolvidas curvas de acompanhamento de previsão de desempenho dos materiais em estudo com modelos de previsão de desempenho compatíveis. (Modelos a serem determinados na revisão bibliográfica).
- Foi realizada uma estimativa do componente através de uma análise de LCCA (Life Cycle Cost Analysis).

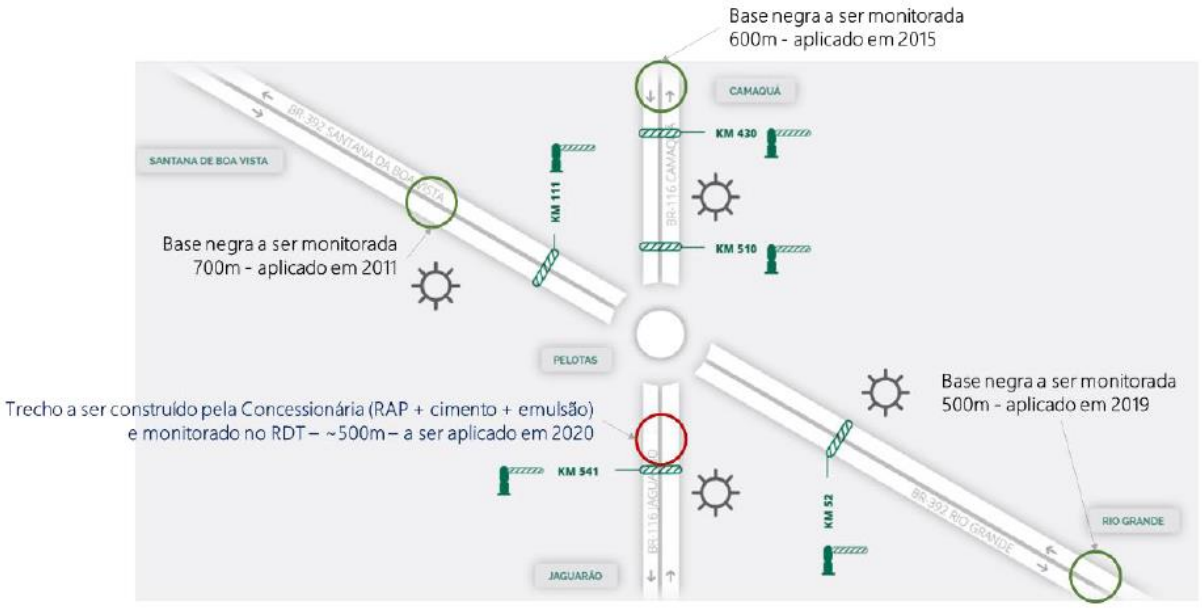
Minuta, Norma ou Instrução de Serviço & Relatórios

Foi Delimitado junto ao IPR/DNIT preciso escopo para proposta de norma ou instrução de serviço com vistas às melhores práticas de uso dos materiais estudados na pesquisa – base asfáltica de elevado módulo e/ou misturas de RAP + agregado virgem + cimento Portland + emulsão asfáltica.

- Foi composta uma minuta de norma ou de instrução de serviço para uso de camadas asfálticas recicladas com discussão técnica amparado no órgão IPR/DNIT.
- Foram apresentados relatórios parciais à Ecosul.
- Foi apresentando o relatório final à Ecosul.

A Figura 2 ilustra a localização dos trechos monitorados nesta pesquisa, os quais formaram o banco de dados das análises realizadas.

Figura 2: Localização dos trechos existentes a serem monitorados + novo trecho a ser construído pela concessionária



1.5 ENTIDADE E EQUIPE EXECUTORA

1.5.1 Identificação da Entidade

O presente Projeto foi executado através de esforço conjunto da Concessionária ECOSUL e LAPAV/UFRGS, através de Fundação de Amparo homologada pela Universidade FENG.

Sediada em Pelotas, a ECOSUL constitui o Polo Rodoviário de Pelotas com 457,3 quilômetros de extensão composto pelas rodovias BR 116 – entre Camaquã, Pelotas e Jaguarão, em um total de 260,5 quilômetros – e BR 392 – trecho de 196, 8 quilômetros, que corta as cidades de Rio Grande, Pelotas e Santana da Boa Vista. O trecho é administrado pela ECOSUL - Empresa Concessionária de Rodovias do Sul S.A., criada em 19 de janeiro de 1998 especificamente para esse fim. O contrato, firmado junto à Agência Nacional de Transportes – ANTT, prevê a concessão do trecho por um período de 28 anos para operação, conservação e melhorias da rodovia.

A concessionária é parceira de diversas empresas e vem buscando ampliar sua rede de pesquisa através da qualificação do seu corpo técnico, aplicação de técnicas inovadoras e é pioneira no conceito de sustentabilidade rodoviária. Com isto vem buscando uma aceleração para o desenvolvimento de pesquisas na área de infraestrutura rodoviária através de recursos disponibilizados pelo RDT (Recurso para Desenvolvimento Tecnológico) junto à ANTT (Agência Nacional de Transportes Terrestres), cenário este que esta pesquisa se insere.

1.5.2 Identificação da equipe executora

EQUIPE LAPAV/UFRGS:

PROF. LÉLIO ANTÔNIO TEIXEIRA BRITO, PhD. (coordenador)

PROF. WASHINGTON PERES NÚÑEZ, DSc (vice-coordenador)

PROF. JORGE AUGUSTO PEREIRA CERATTI, DSc

PROFª. MÔNICA REGINA GARCEZ, DSc

SABRINA DA ROSA POJO SANTOS, Dsc

ENGª. GRACIELI BORDIN COLPO, Drª

ENGª. THAÍS RADÜNZ KLEINERT, Drª

ENGº. LEONARDO LUNKES, MSc

ENG° IGOR SIECZKOWSKI MOREIRA
Sr. IGOR SANTOS CRUZ
Sra. KATLIN MODESTO DORNELES

EQUIPE DA CONCESSIONÁRIA:
ENG. CLÁUDIO RENATO CASTRO DIAS
ENGª CECILIA FORTES MERIGHI
ENG. MARCIO JOAQUIM DOS SANTOS
ENG. MIQUÉIAS NEUENFELD
ENG. DOUGLAS MARTINS MOCELIN

2. PRIMEIRO SEMESTRE DO PROJETO

2.1 Resumo

As atividades do presente RDT iniciaram-se em janeiro de 2023, sendo que o primeiro semestre foi finalizado em junho de 2023. As atividades contidas no Plano de Trabalho desenvolveram-se conforme o cronograma físico-financeiro.

2.2 Atividades Previstas para o Período

Para o período que contempla o primeiro semestre do projeto “Estudo de compósitos de cimento, emulsão com fresado asfáltico e agregados virgens para bases de elevado desempenho” estavam previstas para realização as seguintes atividades:

1. Etapa de Laboratório
2. Etapa de Campo
3. Elaboração de relatórios

2.3 Atividades Executadas para o Período

Para o período que contempla o primeiro semestre do projeto “Estudo de compósitos de cimento, emulsão com fresado asfáltico e agregados virgens para bases de elevado desempenho” foram executadas as seguintes atividades:

1. Etapa de Laboratório
2. Etapa de Campo
3. Elaboração de relatórios

2.4 Justificativas

Todas as atividades previstas foram executadas.

2.5 Descrição das Atividades Desenvolvidas

O primeiro semestre do projeto " Estudo de compósitos de cimento, emulsão com fresado asfáltico e agregados virgens para bases de elevado desempenho ", compreendido entre os meses de janeiro a junho de 2023, transcorreu conforme o previsto no cronograma. As atividades desenvolvidas incluíram a realização de uma revisão bibliográfica sobre o tema, a execução de etapas de laboratório e de campo. A seguir, são descritas as atividades executadas no primeiro semestre.

2.5.1 Introdução a BSM e seus principais aspectos

A busca por materiais inovadores, ambientalmente amigáveis e capazes de atender às demandas impostas é de extrema importância para garantir a qualidade dos pavimentos. A reutilização de materiais de pavimentação recuperados, que seriam descartados ou subutilizados, está ganhando destaque nas pesquisas e nas demandas das construtoras de pavimentos rodoviários, por meio de técnicas de reciclagem.

O RAP, do inglês "*reclaimed asphalt pavement"* ou fresado, como é conhecido no Brasil, é um material obtido na remoção de uma ou mais camadas do pavimento, por meio de um processo denominado fresagem. Esse material vem ganhando espaço nos processos de recuperação de pavimentos, pois apresenta uma boa granulometria e um percentual de ligante já incorporado. Em um passado recente, o fresado era descartado ou doado para prefeituras ou vizinhos das obras, pois não havia demanda para seu reaproveitamento pelas próprias construtoras.

A reincorporação desse material, nas camadas de base e sub-base, por meio do processo de reciclagem de pavimentos, está ganhando força. Existem diferentes métodos tanto para a execução quanto para a dosagem de materiais que utilizam o fresado em sua composição. Um desses métodos

é a reciclagem, que consiste em uma técnica de reabilitação de rodovias que busca a reutilização de materiais já envelhecidos, incorporando-os como novas misturas, com ou sem agentes rejuvenescedores, agregados para a correção granulométrica e até cimento, cal ou outros aditivos químicos (Fedrigo, 2015; Motta *et al.*, 2022). Além disso, a execução da reciclagem pode ocorrer em campo, reciclagem *in situ,* ou em usinas, onde há um maior controle dos materiais e maior qualidade de mistura, embora exija o transporte do material para a planta (SABITA, 2020). A incorporação do fresado pode ser feita a quente ou a frio.

A reciclagem a frio envolve a mistura de agregados virgens juntamente com Pavimento Asfáltico Recuperado (*RAP)* em temperatura ambiente adicionando uma pequena quantidade de asfalto (emulsão/espuma) e enchimento ativo (cimento, cal ou afins) (Mondal; Kuna, 2022; Wirtgen Group, 2012). Os materiais resultantes dessa mistura conhecidos como materiais estabilizados com betume (asfalto) do inglês *Bitumen Stabilization materials* (BSM) (SABITA, 2020). Os BSMs são usados principalmente em projetos de reabilitação de pavimentos onde o desgaste na estrutura do pavimento existente está confinado às camadas superiores. Assim, a maioria dos projetos de BSM realizados nas últimas duas décadas tem se preocupado com a reabilitação e modernização de pavimentos (reforço e/ou alargamento) onde o material in situ é reciclado (Wirtgen Group, 2012).

Os processos execução e dosagem do material em laboratório apresentam variações. No Brasil, encontra-se especificações técnicas relacionas a reciclagem de pavimento asfáltico *in situ* com adição de com adição de emulsão, identificada pelo código ET-DE-P00/034, a qual estabelece o processo de dosagem. Também, tem-se as normas DNIT 166/2013 - Reciclagem de pavimento a frio “in situ” com adição de espuma de asfalto e DNIT 169/2014 - Reciclagem de pavimento em usina com espuma de asfalto, além de diretrizes estaduais para reciclagem de pavimentos. Ressalta-se, no entanto, que a maioria das normativas encontradas no País, relativas à reciclagem de pavimentos com ligantes asfálticos, consideram somente a incorporação de espuma de asfalto.

A nível internacional, há uma maior gama metodologias de dosagem e execução de BSM que utilizam emulsão asfáltica, objeto de estudo deste trabalho. Pode-se destacar como o manual TG2 - Technical Guideline (TG2): Bitumen Stabilized Materials da República da África do Sul, o Manual de reciclagem a frio da Wirtgen Group, e manuais da ARRA (Asphalt Recycling & Reclaiming Association) sobre reciclagem e FDR (*full depth reclamation*). Entretanto, as

informações contidas em cada um desses procedimento/manuais/especificações apresenta variações.

2.5.1.1 Bitumen Stabilization Materials

O BSM do inglês *Bitumen Stabilization Materials* são materiais estabilizados com asfalto. A estabilização ocorre quando espuma de asfalto ou emulsão asfáltica são misturados com, agregados virgens, RAP, ou misturas de agregados virgens e RAP (SABITA, 2020). Somado a adição do agente estabilizador, pode-se adicionar um filler ativo, como cal ou cimento, sem exceder o teor de 1%, pois em princípio, considera-se que teores acima tornariam o material estabilizado com o filler ativo e não com a emulsão.

O BSM é utilizado tanto para pavimento novos quanto para a reabilitação, sendo sua execução realiza *in situ* ou em usina. A sua execução pode ocorrer como camadas de reabilitação FDR ou então *overlay*.

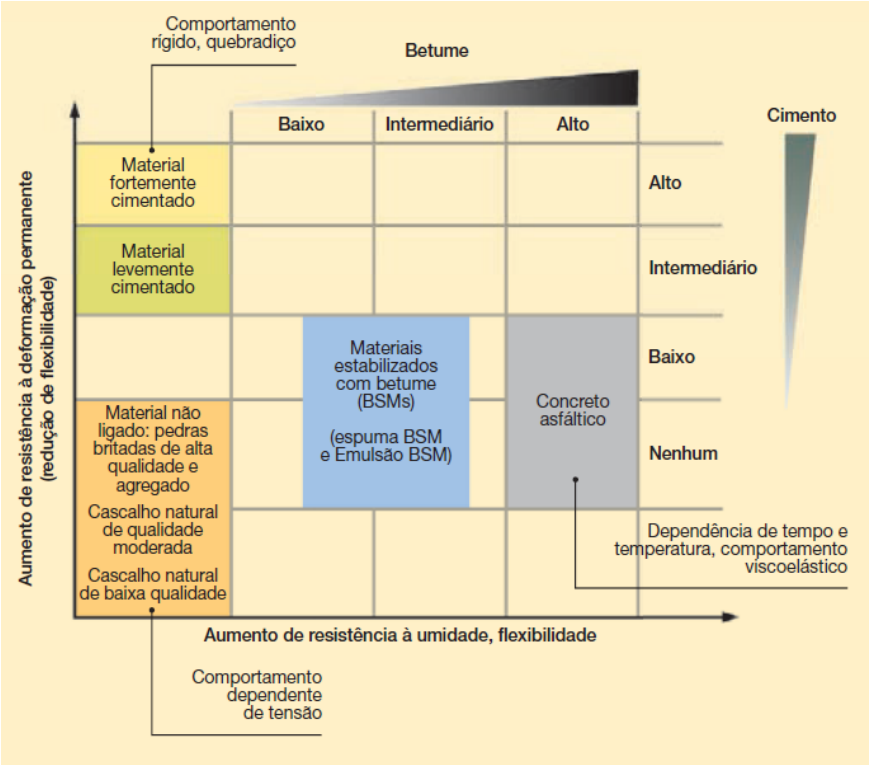
Um dos principais guias que sobre BSM é o TG2 - *Technical Guideline: Bitumen Stabilised Materials*, da Republica da África do Sul (SABITA, 2020). Ele apresenta as principais características, processos de dosagem e execução de BSM. O documento traz como as principais características dos BSM:

- Coesão significativa em comparação com materiais não estabilizados, com ângulo de atrito interno semelhante ao de materiais não tratados;
- Adquirem resistência a flexão devido ao efeito combinado das propriedades viscoelásticas do ligante disperso nas misturas. Contudo destaca-se que as gotículas individuais de asfalto não estão ligadas a partículas de agregados mais grossos que permanecem sem revestimento, ou seja, dependem do estado de tensão. Não sendo propenso a trincamento quando submetido a tensões de tração, pois as bases estabilizas deste tipo tendem as características do material granular original.
- Apresenta uma boa sensibilidade a umidade e consequentemente uma maior durabilidade. Isso se deve ao ligante asfáltico ficar disperso apenas entre as partículas mais finas de agregados, onde os finos ficam encapsulados e imobilizados. Com essa condição, dedes que seja aplicada uma taxa suficiente de asfalto, a uma menor tendência dos BSM bombear finos ao ser solicitado pelas cargas de tráfego.

- Como o comportamento das BMS é característico dos materiais granulares, a rigidez dos materiais estabilizados depende de: Rigidez inerente do material granular; Densidade do material da camada compactada em campo; Quantidades de material asfáltico residual e do fíler ativo adicionado e sua dispersão em todo o material misturado; Clima local, particularmente a temperatura ambiente e a pluviosidade; Rigidez da camada de suporte; Elevada componente coesiva que permite que o material sofra menores deformações sob carga do que o material granular não estabilizado; Deformação permanente, pois é o principal mecanismo de ruptura desses materiais; Quantidades de asfalto residual e do filler ativo utilizados, uma vez influenciam no comportamento e na rigidez das BMS.
- O principal mecanismo de falha do BSM é a deformação permanente;
- Como é um material tratado com cimento, recomenda-se a utilização de somente 1% de filler ativo, pois quando se ultrapassa esse percentual, o comportamento do material muda para cimentado, fazendo com que a adição do componente asfáltico passe a não ser necessária, mudando as propriedades do mesmo.

Quando cimento excessivo é aplicado, o material se comporta mais como material tratado com cimento e o benefício da adição de asfalto como emulsão ou espuma é discutível. Por esta razão, a adição de cimento é limitada a 1% (em massa) (SABITA, 2020; Wirtgen Group, 2012). A Figura 3 ilustra o posicionamento dos BSM frente aos demais materiais utilizados como elementos de pavimentação.

Figura 3: Comportamento de materiais utilizados na pavimentação



Fonte: WIRTGEN GROUP (2012)

2.5.1.2 Classificação de Projeto

Os materiais que compõem os BSM variam de acordo com o projeto bem como a disponibilidade de materiais encontrados onde se deseja executar o pavimento. Somado a isso, a escolha dos materiais impacta diretamente quanto a classificação do tipo da mistura, frente a qualidade do agregado e do tráfego que será imposto. Conforme o manual da Wirtgen (2012), ao qual baseou-se no manual TG2 (SABITA, 2020), classifica-se os BSM em:

- BSM Classe 1 (BSM1): Materiais com alta resistência ao cisalhamento. Estes materiais são adequados para a construção da camada de base em pavimentos com uma capacidade estrutural superior a 3 milhões de ESALs (carga equivalente por eixo único).
- BSM Classe 2 (BSM2): Materiais com moderada resistência ao cisalhamento. Estes materiais são adequados para a construção da camada de base de pavimentos com

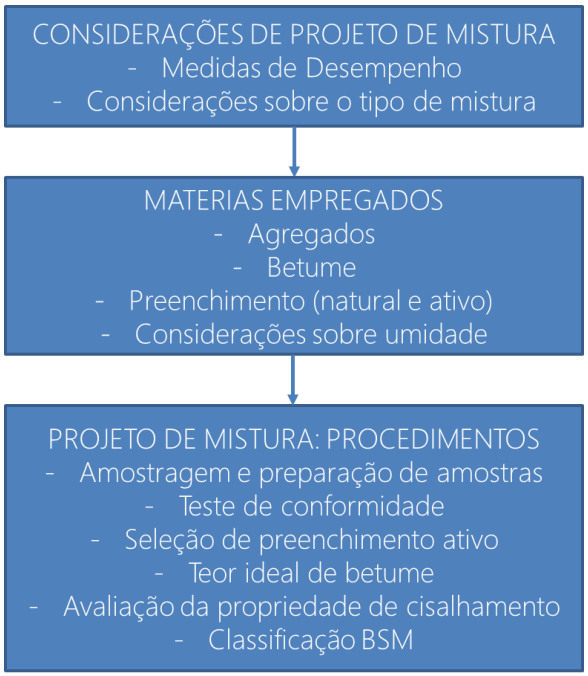
capacidade estrutural inferior a 3 milhões de ESALs, onde os métodos empíricos (métodos SN e PN) são adequados para conceber o pavimento).

Na literatura, ainda pode-se encontrar uma terceira classificação, correspondente a um material que consiste tipicamente em solo-cascalho e/ou areia, estabilizado com maiores teores de asfalto residual. O material é adequado apenas para aplicações em baixos volumes de tráfego de projeto.

2.5.1.3 Dosagem

O processo de dosagem utilizada no presente trabalho seguiu o preconizado no TG2 (SABITA, 2020). Outros métodos de dosagem podem ser utilizados, entretanto optou-se em um primeiro momento pelo método Sul Africano devido as características dos materiais utilizados serem semelhantes ao do Brasil. As varrições dos demais métodos encontrados na literatura referem-se a procedimentos de cura, compactação e dimensões dos corpos de prova. A Figura 4 apresenta as principais etapas seguidas para a determinação da dosagem do BSM. Os procedimentos dividem-se em três principais etapas: Considerações de projeto de mistura, materiais empregados, e procedimentos de mistura.

Figura 4: Procedimento de dosagem BSM - procedimento TG2



2.5.1.3.1 Considerações para o projeto de dosagem

O emprego de misturas BSM deve levar em consideração a sua natureza flexível e durável. No entanto, deve-se também levar em consideração a existência de mecanismos fundamentais que precisam ser considerados para avaliação da mistura.

A deformação permanente deve ser avaliada, pois depende das propriedades de cisalhamento do material e da densificação alcançada:

– Melhor granulação agregada (contínua), angularidade, forma, dureza e rugosidade.

– Aumento do tamanho máximo de partícula.

– Melhor compactação, ou seja, maior densidade de campo durante a construção.

– Teor de umidade reduzido (cura).

– Aplicação limitada de asfalto, inferior a 3%. Taxas de aplicação mais altas de asfalto estimulam a deformação permanente.

– A adição de filler ativo é limitada a um máximo de 1% porque os maiores teores de filler ativo criam fragilidade, o que encoraja o encolhimento e a trinca associada ao tráfego, ou seja, a fadiga se torna um mecanismo de falha que desclassifica o material do status BSM.

Somado a isso, a suscetibilidade a umidade que o material terá contato, também necessita ser considerada. Por ser utilizado comumente como uma camada de base, a presença de água pode ser constante. Assim, a suscetibilidade à umidade é uma medida dos danos causados pela exposição de um BSM a altos teores de umidade e pressões de poros causadas pelo tráfego. O dano ocorre como perda de adesão entre o ligante asfáltico, oriundo da emulsão asfáltica, e o agregado, levando à perda de resistência ao cisalhamento. A resistência à umidade é aprimorada por:

– Aumento da adição de emulsão ou espuma de asfalto, considerando as implicações de custo.

– Adição de filler ativo, limitado a 1% em massa de agregado seco, para aumentar a aderência do ligante asfáltico e do agregado.

– Melhor compactação.

– Classificação contínua suave.

Em geral, as misturas de emulsão asfáltica reciclada a frio apresentam desempenho satisfatório em termos de resistência a danos por umidade, resistência a formação de sulcos e resistência a rachaduras em baixa temperatura em comparação com HMA (Yan *et al.*, 2017)

Materiais estabilizados com espuma ou emulsão asfáltica são materiais ligados de forma não contínua, de modo que o BSM é semelhante ao comportamento de materiais granulares não ligados, contido apresentam uma coesão melhorada e uma reduzida sensibilidade à umidade (Wirtgen Group, 2012).

2.5.1.3.2 Materiais empregados

Materiais Pétreos e RAP

A utilização de agregados deve respeitar as propriedades necessárias para o tratamento bem-sucedido com emulsão, incluindo características de durabilidade do agregado natural (não tratado), resistência (dureza), plasticidade, classificação, composição espacial e características de intemperismo (SABITA, 2020).

Assim como os agregados virgens o RAP deve ser classificado e estudado para compor a mistura de BSM. Referente especialmente a granulometria, encontra-se uma questão importante. O RAP deve ser considerado como um "*Black rock"* (agregado negro), ou deve ser considerado a sua granulometria original, após a extração do ligante asfáltico?

O método sul-africano de projeto de mistura trata o material RAP como um agregado preto e não considera a influência do amolecimento do ligante asfáltico envelhecido presente no RAP. Por outro lado, o procedimento de projeto de mistura desenvolvido nos Estados Unidos tem material RAP com maior porcentagem de agregados revestidos com ligante, pois os pavimentos nos Estados Unidos têm camada betuminosa espessa suportada por camada de base e sub-base (CHANDRA; VEERARAGAVAN; KRISHNAN, 2013). Os manuais da ARRA (ARRA, 2016; Recommended Mix Design Guidelines For Cold Recycling Using Foamed (Expanded) Asphalt Recycling Agent (CR202)2017, 2018), bem como o Manual da Wirtgen (Wirtgen Group, 2012) e o Livro pavimento Sustentável (Bonfim, 2021), consideram o RAP com sua granulometria não extraída, ou seja, *Black rock.*

Algumas agências consideram a contribuição do ligante asfáltico envelhecido presente no RAP, mas a maioria das agências normalmente trata o RAP da mesma forma que agregado natural ou rocha negra, ou seja, o ligante asfáltico no material RAP é considerado inerte devido às baixas temperaturas de produção (Mondal; Kuna, 2022).

Emulsão Asfáltica

A emulsão asfáltica é o nome ao composto formado por um CAP (ou asfaltos diluídos) adicionando água e agentes emulsificantes em pequenas proporções (Balbo, 2016; Bernucci *et al.*, 2022). Diferentemente do CAP, emulsões asfálticas são manuseadas a temperaturas muito mais baixas, além de ser disperso em água (SABITA, 2020). A emulsão asfáltica é uma suspensão de minúsculas gotículas de asfalto em água. O asfalto é mantido em suspensão por um emulsificante, um composto ativo de superfície que adere a cada gota individual, fornecendo-lhe uma carga. O agente emulsionante utilizado determina a carga das gotículas de asfalto na emulsão:

• As emulsões catiônicas são carregadas positivamente.

• Emulsões aniônicas são carregadas negativamente.

No brasil as especificações das emulsões asfálticas para pavimentação são feitas em função:

- Do tempo necessário para ruptura, dividindo em lenta, média ou rápida;
- Do ter de asfalto contido na mesma;
- Da carga iônica.

Contudo, novos tipos de emulsão vem sendo desenvolvidos como as emulsões que buscam a reativação das características aglutinantes dos ligantes presentes no RAP, quando o mesmo é utilizado nas misturas de BSM (GRECA, 2023).

Em uma nova resolução da ANP, definiu as características para emulsões utilizadas em reciclagem de revestimento, reciclagem profunda e estabilização de solo. A Tabela 1 apresenta as principais características das cinco classificações.

Tabela 1: Características das emulsões asfálticas para serviços de reciclagem de revestimento, reciclagem profunda e estabilização de solos

CARACTERISTICAS		Ruptura Controlada				
		EAR1	EAR2	EAR2-E	EARP	EA5S
INDICAÇÃO PREFERENCIAL DE USO	Método de ensaio (ABNT)	Reciclagem de revestimento asfáltico com uso parcial de fresado	Reciclagem de revestimento asfáltico com uso de 100% fresado	Reciclagem de revestimento asfáltico com uso de 100% fresado	Reciclagem profunda	Estabilização de solos in Situ
Ensaio sobre a emulsão						
viscosidade Saybolt Furol, S, a 25°C	NBR 14491	90 máx.	90 máx.	90 máx.	100 máx.	50 máx.
Sedimentação , (±) em massa	NBR 6570	5	5	5	5	10
peneiração, 0,84mm, % em massa, máx.	NBR 14393	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Carga da Partícula	NBR 6567	Positiva	Positiva	Positiva	Positiva	NA
Resíduo seco, % em massa, mín.	NBR 14376	62	62	62	64	55
Mistura com cimento, %	NBR 6297	NA	NA	NA	4 máx.	NA
Ensaio sobre o Resíduo da emulsão obtido pela ABNT NBR - 14896						
Penetração a 25°C, 100g, 5s, 0,1mm	NBR 6576	60 a 80	85 mín.	85 mín.	40 a 150	40 a 150
Recuperação elástica a 25°C, 10cm, %, mín.	NBR 15086	NA	NA	NA	NA	NA

Fonte: ANP (2022)

Filler cimento

Diferentes tipos de filler ativo podem ser utilizados em misturas BSM. Cimento (não recomendado os cimentos de cura rápida), cal hidratada, cinzas volantes, escoria, entre outro são exemplos de filler a serem utilizados. Conforme o TG2 (SABITA, 2020), o objetivo se incorporar o filler ativo no BSM é:

- Melhorar a aderência do asfalto residual da emulsão ao agregado.
- Melhorar a dispersão da emulsão na mistura.
- Modificar a plasticidade dos materiais naturais (reduzir PI).
- Aumentar a rigidez da mistura e a taxa de ganho de resistência.
- Acelerar a cura da mistura compactada.

- Auxiliar na ruptura da emulsão asfáltica.

Contudo, o comportamento dos BSMs varia significativamente dependendo da qualidade do material não tratado e da quantidade de asfalto e carga ativa aplicada. A quantidade de cimento deve ser limitada para evitar a diminuição da flexibilidade das misturas (Yan *et al.*, 2017). Quando cimento excessivo é aplicado, o material se comporta mais como material tratado com cimento e o benefício da adição de emulsão asfáltica é discutível. Por esta razão, a adição de cimento é limitada a 1% (em massa) (Bonfim, 2021; SABITA, 2020; Wirtgen Group, 2012).

Com baixa dosagem de cimento, os produtos de hidratação se dispersam no interior dos filmes de betume fresco, aumentando a viscosidade da mistura e melhorando a resistência a deformações permanentes (Graziani *et al.*, 2016). Com o aumento do teor de cimento, a estabilidade à umidade, a estabilidade em alta temperatura e a resistência das misturas recicladas a frio aumentam, enquanto a resistência à fissuração em baixa temperatura aumenta primeiro e depois diminui. (Yan *et al.*, 2017)

Os mecanismos de cura não ocorrem imediatamente após a compactação, mas são graduais e podem levar semanas ou meses. Por exemplo, a taxa de quebra da emulsão depende do tipo e conteúdo do emulsificante, do valor do pH dentro da mistura e da presença de partículas finas (ou seja, carga ou cimento). Por outro lado, a taxa de perda de umidade está estritamente relacionada às condições de contorno das camadas recicladas, como temperatura e umidade relativa. Além disso, como as reações de hidratação do cimento requerem a presença de água, o uso de cimento acelera o processo de cura da emulsão por reduzir a quantidade de água livre (Graziani *et al.*, 2016).

2.5.1.3.3 Projeto de Mistura: Procedimentos

O processo de recebimento, quarteamento e armazenamento do material é de fundamental importância para garantir a correta caracterização e execução de misturas do tipo BSM. A realização de ensaios prévios de caracterização dos agregados, como análise granulométrica e ensaio de abrasão Los Angeles, é indispensável. No caso do RAP (asfalto reciclado), é essencial conhecer suas propriedades originais, incluindo os teores de ligante, para obter uma visão geral das características do material empregado.

A determinação da curva granulométrica dos materiais que compõem a mistura é igualmente relevante, pois, a partir dessas informações, é realizada a composição da BSM. O resultado desse processo deve estar enquadrado nos limites granulométricos superior e inferior definidos pelo TG2. A Tabela 2 apresenta as faixas granulométricas que devem ser respeitadas para adequar a dosagem da BSM às especificações. Observa-se que há diferentes limites estabelecidos para misturas com emulsão asfáltica e com espuma de asfalto. Além disso, verifica-se que o conjunto de peneiras utilizado para a análise granulométrica dessas misturas difere daquele normalmente empregado em análises granulométricas convencionais.

Tabela 2: Faixas granulométricas recomendadas para BSM

Tamanho da Peneira	Porcentagem que passa por cada tamanho de peneira (%)		
	Classificações de alvo BSM-Emulsão	Classificação para BSM-Emulsão, com > 50% RA	
	Limites superior e inferior	Não processado	Impacto esmagado
50	100-100	100	100
37,5	87 - 100	85	100
28	76 - 100	72	100
20	65 - 100	60	100
14	55 - 100	49	88
10	48 - 89	41	69
7,1	41 - 78	33	55
5	35 - 68	27	43
2	25 - 48	15	22
1	18 -37	9	13
0,6	12 - 30	6	9
0,425	10 - 26	4	7
0,3	8 - 22	3	5
0,15	3 - 15	2	3
0,075	2 - 10	1	1

Fonte: Adaptado de SABITA (2020)

Após determinar os materiais que compõem a BSM, bem como suas porcentagens, realiza-se a obtenção da curva de compactação para determinação da umidade ótima e densidade. Recomenda-se seguir a NBR 7182:2016 Solo - Ensaio de Compactação (ABNT, 2020), considerando energia modificada e cilindro grande, devido ao tamanho das partículas utilizada.

Quando realiza -se projetos de BSM tratadas com emulsão asfáltica, deve-se determinar o conteúdo ótimo de fluidos (OMC) com base no MDD para ter-se o total de fluidos da mistura. Destaca-se ainda que antes de aplicar a emulsão na mistura, é importante ter-se um mínimo de 1 a 2% de umidade no agregado (SABITA, 2020). A Equação 1 apresenta como é obtido o teor ótimo de fluidos,

$$OFC = FMC + EWC + RBC \quad (1)$$

Onde:
OFC = conteúdo ótimo de fluidos (%);
FMC = teor de umidade de campo do agregado (%);
EWC = Conteúdo de água na emulsão;
RBC = teor de betume residual como porcentagem de agregado seco (%)

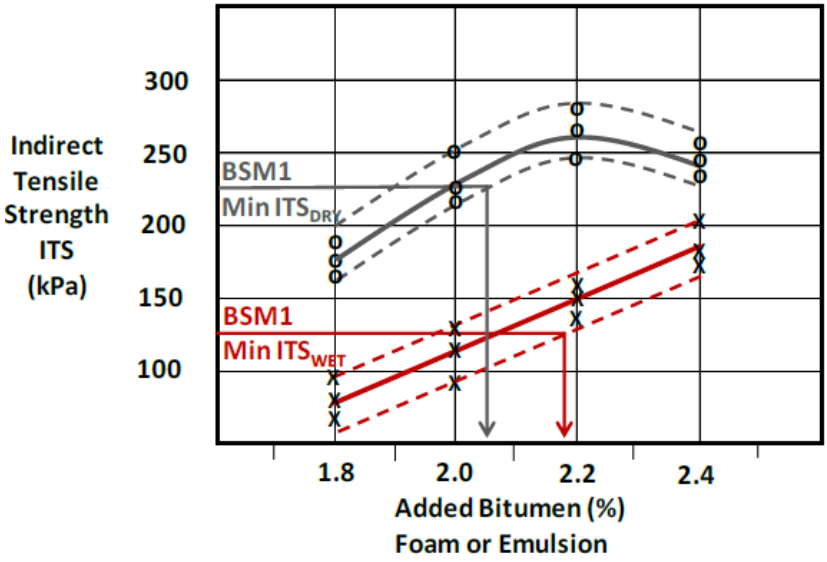
Quanto a compactação do material, para moldagens de corpos de prova, para os diferentes ensaios, o processo pode ser realizado manualmente ou mecanicamente. Como, optou-se por realizar os procedimentos do TG2, a compactação indicada no manual é com o auxílio de um compactador vibratório de 23 Joules. O tempo de compactação não deve ser superior a dois minutos por camada. Para a determinação do teor de emulsão a ser utilizado pela BSM, o TG2 recomenda a realização de dois ensaios principais: Resistencia a tração indireta - ITS (Indirect tensile strength), ou triaxiais monotônicos para determinação da coesão e ângulo de atrito. Os CP's de ITS devem possuir 150mm de diâmetro e 95mm de altura, compactados em duas camadas. Já os CP's para triaxial monotônico, devem ser moldados com 150mm de diâmetro e 300mm de altura, compactados em cinco camadas.

Procedimentos ITS

Seis corpos de prova para cada teor de emulsão de 152 mm de diâmetro e 95 mm de altura são fabricados para cada composição de mistura no projeto de mistura. A variação de quantidade de emulsão varia para se obter o ponto ótimo. A Figura 5 apresenta um exemplo desta variação, onde

um teor de 1,8 a 2,4% de emulsão residual foi adicionado para se obter uma curva a qual se determina o teor ótimo de emulsão a ser aplicado para a dosagem que se está sendo estudada.

Figura 5: Seleção Teor de Emulsão Residual



Fonte: SABITA (2020)

O procedimento de cura a ser seguido:

• Uma vez extraídos os corpos de prova de seus respectivos moldes e marcados, são colocados em estufa de tiragem forçada a temperatura de 40 °C (±1 °C) e período mínimo de 72 horas (3 dias). Este procedimento produz a condição “Seca” para teste.

• Após 72 horas, os corpos de prova são retirados da estufa, pesados e registrada a massa individual.

• Retorne todas as amostras ao forno a 40 °C por mais 4 horas e repita o exercício de pesagem. Se a massa de qualquer amostra diminuir em mais de 10 g, coloque todas as amostras novamente no forno por mais 24 horas. Este procedimento é repetido quantas vezes forem necessárias até que os corpos de prova atinjam massa constante.

• As amostras são então deixadas para resfriar a uma temperatura constante de 25 °C (±2 °C). Após resfriamento por um tempo mínimo de 20 horas, determine a densidade aparente de cada corpo de prova.

• Exclua do teste qualquer amostra com densidade aparente que difira da densidade aparente média de todas as seis amostras em mais de 2,5%.

• Colocar metade das amostras debaixo de água no banho de imersão durante 24 horas a 25 °C (± 2 °C). Após a imersão, remova as amostras da água, seque a superfície e teste imediatamente.

Os resultados do procedimento de resistência a tração indireta devem obedecer a Tabela 3, caso não se atenda o valor mínimo para o ITS seco e/ou úmido, bem como a relação entre os valores de ITS seco e úmido, a dosagem deve ser readequada.

Tabela 3: Valores referência para dosagem BSM

Classe	RAP (%)	ITS (kPa)		Triaxial Monotônico		
		ITS seco	ITS úmido	Coesão (kPa)	Anglo de atrito (°)	Coesão retida (%)
BSM 1	<50%	225	125	250	40	75
	50-100%	225	125	265	38	75
BSM 2	<50%	175	100	200	38	65
	50-100%	175	100	225	35	75

Fonte: SABITA (2020)

Procedimento Triaxial Monotônico

Dez corpos de prova, 150 mm de diâmetro e 300 mm de altura são fabricados para cada teste seguindo o procedimento para fabricação de corpos de prova usando compactação com martelo vibratório considerando o teor ótimo de projeto, obtido conforme o procedimento do item anterior.

• Deixe todos os dez espécimes durante a noite em seus respectivos moldes cobertos com um pano de juta úmido.

• Na manhã seguinte, retire os espécimes de seus respectivos moldes, marque cada um com um número de identificação apropriado e determine a densidade aparente de cada espécime.

• Calcule a média e o desvio padrão da densidade aparente para todos os dez espécimes e determine se algum dos espécimes é atípico e deve ser excluído de testes adicionais. Se mais de dois espécimes forem excluídos, o teste deve ser abandonado, conforme detalhado no método de teste.

• Colocar os espécimes em estufa de tiragem forçada a uma temperatura de 40 °C (± 1 °C) por um período de 8 horas. Após 8 horas, remova todas as amostras do forno, coloque cada uma em um saco plástico solto, feche os sacos e retorne as amostras ao forno a 40 °C (± 1 °C) por mais 48 horas. Esta cura das amostras triaxiais produz uma condição de "Equilíbrio" para teste.

• Retire as amostras do forno após 48 horas. Retire duas das amostras de seus sacos plásticos e coloque-as em banho de imersão por 24 horas. Certifique-se de que as amostras estejam submersas com pelo menos 25 mm de água cobrindo as faces superiores.

• Coloque as amostras restantes em sacos plásticos frescos (secos), feche e deixe esfriar a 25 °C (± 2 °C) por um período mínimo de resfriamento de 12 horas. As amostras são apenas retiradas de seus sacos plásticos e pesadas imediatamente antes do teste.

• Remova a(s) amostra(s) encharcada(s) da água após imersão por 24 horas, seque a superfície e pese antes do teste.

2.5.2 Etapa de Laboratório

No Relatório Parcial 1, foram realizadas as primeiras atividades laboratoriais com o objetivo de compreender o comportamento de materiais estabilizados com emulsão asfáltica. Essa etapa de laboratório representou uma parte substancial do plano de trabalho delineado no projeto, sendo executada no período compreendido entre janeiro e junho de 2023.

Conforme documentado no relatório parcial entregue em julho de 2023, algumas das atividades planejadas para a etapa de laboratório foram iniciadas e concluídas ainda dentro do escopo do Relatório Parcial 1, enquanto outras tiveram continuidade e foram finalizadas em relatórios subsequentes.

Visando à organização e clareza das informações, este item apresenta exclusivamente os dados laboratoriais completamente concluídos no período mencionado. As atividades iniciadas durante o intervalo abordado neste relatório, mas concluídas posteriormente, serão detalhadas integralmente nos itens correspondentes dos relatórios subsequentes.

A etapa laboratório iniciou suas atividades em janeiro de 2023. Em um primeiro momento, buscou-se compreender o comportamento dos materiais estabilizados com emulsão asfáltica, suas principais características, procedimentos de composição granulométrica, dosagem de emulsão e seu manuseio, incorporação do *filler* ativo e a cura dos BSM. Outro ponto relevante, foram os tipos de emulsão utilizados para a dosagem deste material. A variabilidade de materiais, principalmente do fresado e curvas granulométricas foram um dos principais obstáculos encontrados.

A etapa laboratorial foi dividida em três partes principais relacionadas diretamente ao tipo de material e traço utilizados:

- BSM-RM-E: Corresponde à primeira dosagem, utilizada no RDT "AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE MISTURAS ASFÁLTICAS COM LIGANTE MODIFICADO POR BORRACHA USINADAS A TEMPERATURAS INTERMEDIÁRIAS E DE BASES NEGRAS USINADAS COM EMULSÃO ASFÁLTICA", composta por fresado (granulometria extraída) + Agregado Virgem (Brita 1 ½" + Brita ¾") + Cimento Portland + Emulsão RM-2C (RAP+AV+CP+EM);

- BSM-RM-nE: Corresponde à segunda dosagem composta por fresado (granulometria não extraída) + Agregado Virgem (Brita 1 ½" + pó de pedra) + Cimento Portland + Emulsão RM-2C (RAP+AV+CP+EM);

- BSM-EARP-nE: Corresponde à segunda dosagem, contudo com troca da emulsão, composto por fresado (granulometria não extraída) + Agregado Virgem (Brita 1 ½" + pó de pedra) + Cimento Portland + Emulsão EARP (RAP+AV+CP+EM);

Dentro de cada uma dessas três variantes na composição dos traços, buscou-se atender aos critérios impostos no projeto do RDT de dosagem, avaliação do comportamento mecânico do material, variações da porcentagem de filler ativo, e processos de cura.

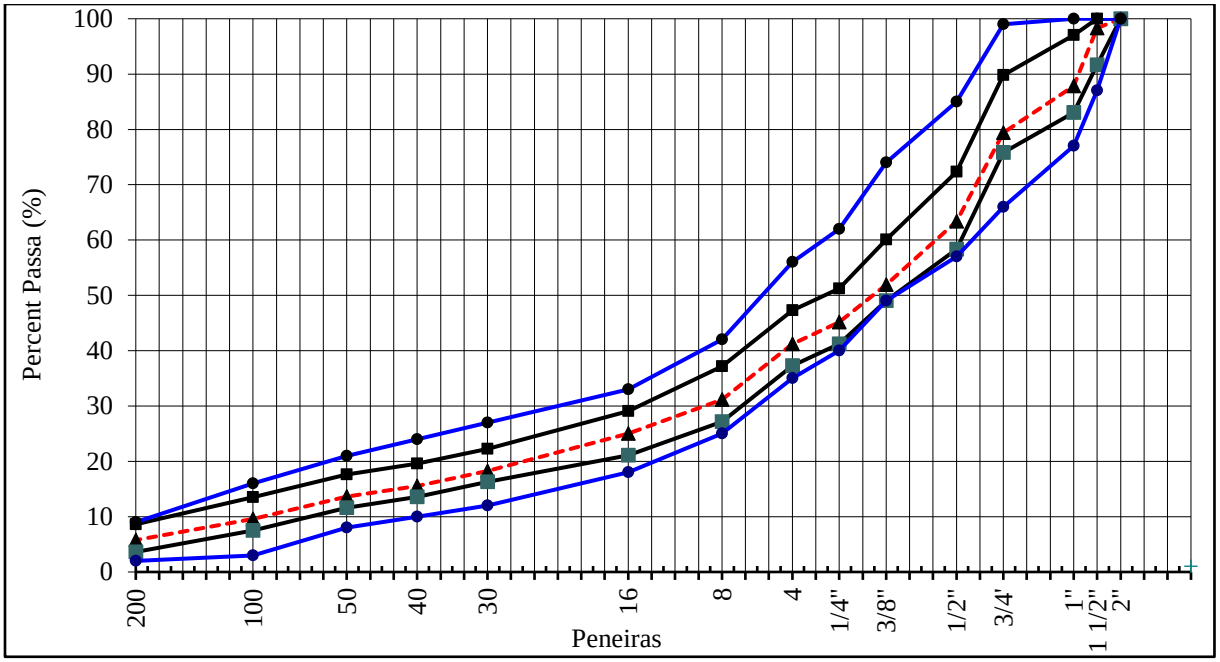
Para a avaliação inicial das misturas em laboratório seguiu-se o preconizado na metodologia de dosagem e avaliação dos BSM prescrita pelo "Technical Guideline (TG2): Bitumen Stabilised Materials (SABITA, 2020).

2.5.2.1 Validação da composição BSM-RM-E

Um dos pontos a ser respondido no projeto foi a validação do projeto BSM desenvolvido no RDT anterior, intitulado “AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE MISTURAS ASFÁLTICAS COM LIGANTE MODIFICADO POR BORRACHA USINADAS A TEMPERATURAS INTERMEDIÁRIAS E DE BASES NEGRAS USINADAS COM EMULSÃO ASFÁLTICA” (ANTT, 2020). Essa validação teve como base o projeto fornecido pela concessionaria Ecosul, parceira no projeto, bem como todos os materiais que seriam utilizados.

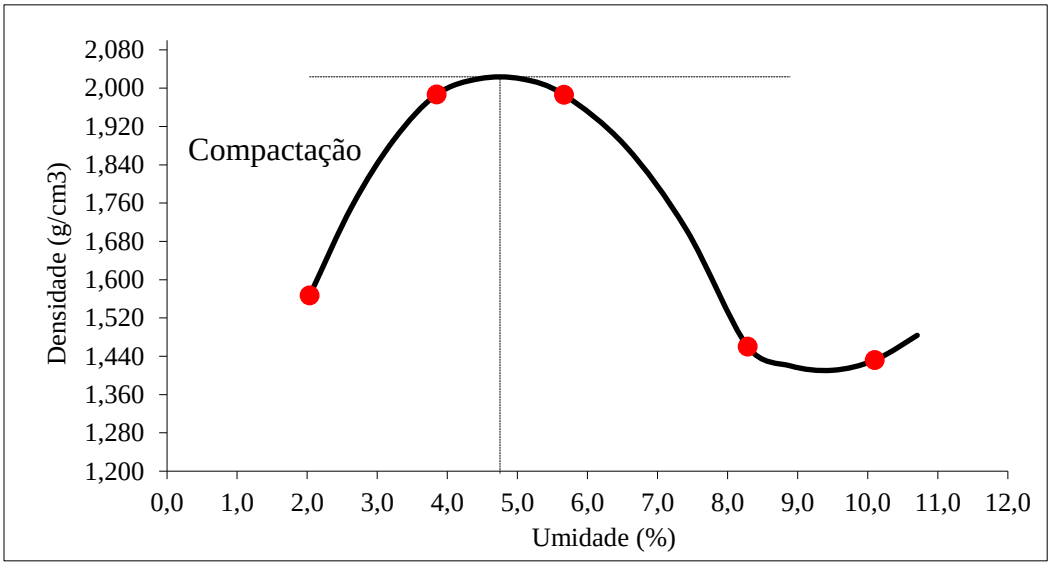
A primeira mistura de BSM, denominada no presente relatório de BSM-RM-E, utilizada no RDT anterior, composta por 55% de fresado, com granulometria definida após extração do ligante, + Agregado Virgem, correspondente à 22% Brita 1 ½” + 22% Brita ¾”, + 1% Cimento Portland, tipo CP-IV, + Emulsão asfáltica de ruptura média, RM-2C. A definição da composição granulométrica foi realizada ao enquadrar a curva granulométrica nos limites estabelecidos pelo método de dosagem definido no TG2 (SABITA, 2020). A Figura 6 mostra a composição granulométrica do projeto BSM-RM-E.

Figura 6: Composição granulométrica de projeto - BSM-RM-E



Juntamente com a composição granulométrica definiu-se o equivalente de areia de 63,9%, a densidade máxima de 2,024 g/cm³ e a umidade ótima de 4,8%, obtidos no ensaio de compactação, utilizando a energia modificada. A Figura 7 apresenta a curva de compactação para o material correspondente ao projeto A. No ensaio de Índice de Suporte Califórnia (ISC), executado conforme a norma DNIT 172/2016 - ME, Determinação do Índice de Suporte Califórnia utilizando amostras não trabalhadas, onde obteve-se um ISC de 75,4% e expansão de 0,00%.

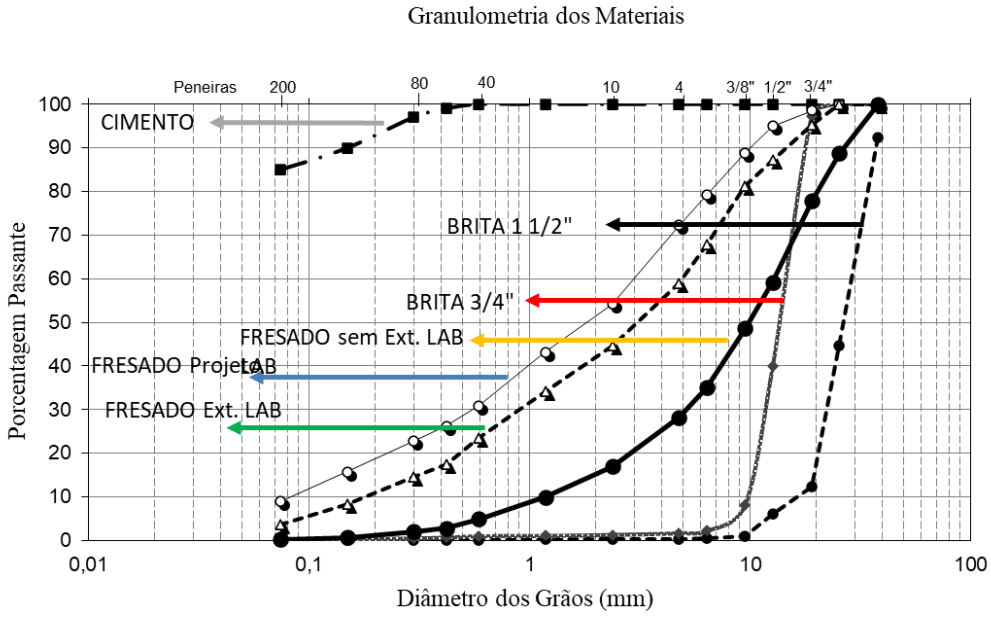
Figura 7: Curva de Compactação - BSM-RM-E



Inicialmente, não se dispunha de informações indicando que a composição da mistura havia considerado a granulometria do fresado extraída por meio de ensaios de extração. Após diversas tentativas de determinar a granulometria dos materiais, foi identificado que a granulometria do fresado utilizado no projeto original havia sido considerada com base em extração. No entanto, constatou-se que o material disponível para a execução do projeto não correspondia mais ao utilizado no RDT anterior. Isso ocorreu porque o projeto original havia sido enviado e elaborado em um período anterior e estava diretamente vinculado ao trabalho desenvolvido no RDT anterior. A Figura 8 apresenta as granulometrias individuais dos materiais. Observando-se as curvas granulometrias, há a ocorrência de três variantes para o material fresado. Isso deveu-se, a variação encontrada entre o material fresado utilizado no projeto de composição granulometria, utilizado inicialmente, versus o material que efetivamente encontrava-se disponível para a realização da

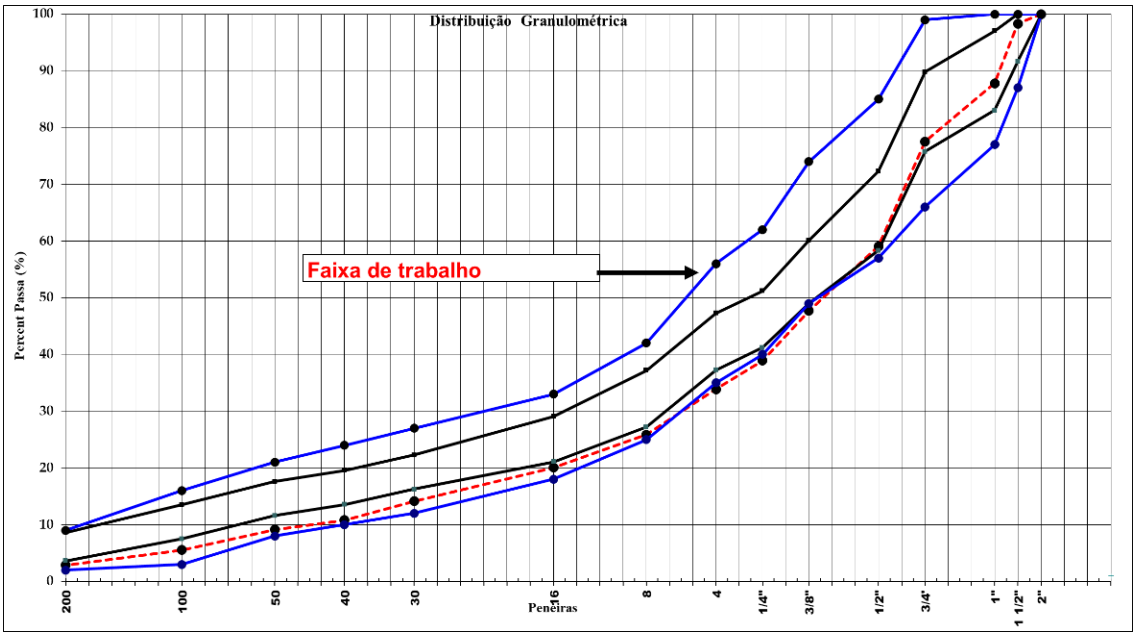
parte experimental. Destaca-se, que essa incompatibilidade de granulometrias do fresado, deveu-se que o projeto inicial foi realizado em um período significativamente anterior ao início do presente RDT. Somado a isso, o fresado apresenta variações, principalmente devido a sua extração ser realizada em diferentes panos, ao longo dos trechos onde é extraído.

Figura 8: Granulometrias materiais



Mesmo apresentando uma divergência entre as granulometrias do fresado de projeto e disponibilizado, tentou-se, em um primeiro momento, realizar a validação do projeto do RDT anterior. Considerando o material disponibilizado pela concessionária, e realizando o mesmo procedimento de extração do ligante para realizar a granulometria, a curva obtida, Figura 9, fica fora dos limites de trabalho em alguns pontos, ou marginal aos mesmos.

Figura 9: Composição granulométrica fresado disponível - BSM-RM-E



Assim, seguindo os conceitos de dosagem abortados no TG2, realizaram-se ensaios de resistência à tração indireta para quatro teores de emulsão residual (1,80%, 2,00%, 2,20% e 2,40%) moldando-se seis corpos de prova para cada teor e para dois métodos de compactação: vibratório e giratório. Para cada grupo de seis corpos de prova, três foram submetidos à cura seca (72 horas em estufa a 40°C + 24 horas a temperatura ambiente de 25°C) e 3 corpos de prova submetidos à cura seca e úmida (72 horas em estufa a 40°C + 24 horas submersos em água a 25°C). Os corpos de prova moldados apresentavam as dimensões de 150mm de diâmetro por 95mm de altura. Na compactação vibratória o tempo foi limitado a dois minutos, sendo compactados em duas ou três camadas, observando a altura das camadas como critério de parada de compactação. Já no compactador giratório, o critério de parada utilizado foi a altura, sendo o material compactado em uma única camada. A emulsão utilizada, em ambos os métodos de compactação, foi uma RM-2C. A Tabela 4 apresenta as características do produto, obtidas no certificado emitido pela empresa fornecedora da emulsão.

Tabela 4:Características RM-2C

Ensaio	Norma	Especificação	Resultado
Sedimentação, % peso	NBR 6570	Máximo 5,0%	0,09
Peneiração 0,84mm, % peso	NBR 14393	Máximo 0,10%	0,02
Carga de partícula	NBR 6567	Positiva	Positiva
resíduo asfáltico, % peso	NBR 14376	Mínimo 65,0%	65,8
Viscosidade Saybolt-Furol a 50°C, S	NBR 14494	100 a 400 SSF	287
Desemulsibilidade, % peso	NBR 6569	Máximo 50%	14,8

Fonte: GRECA Asfaltos (2022)

Para a compactação vibratória, utilizou-se um martelo da marca BOSCH modelo GHS 11VC com energia de impacto e 23J, com as características descritas na Figura 10. Salienta-se que o mesmo compactador vibratório é indicado pelo TG2 (SABITA, 2020).

Figura 10: Características técnicas e representação compactador vibratório

Dados Vibrador Bosch GSH 11VC	
Potência nominal absorvida	1.700 W
Energia de impacto	23 J
Dimensões da ferramenta (comprimento)	290 mm
Número máx. de impactos	900 – 1.700 i.p.m.
Peso	11,4 kg
Dimensões da ferramenta (largura)	110 mm
Dimensões da ferramenta (altura)	236 mm
Suporte da ferramenta	SDS max
Valores totais de vibração (Cinzelamento)	
Valor de emissão de vibrações ah	8 m/s²
Incerteza K	1,5 m/s²
Cinzelamento	
Valor de emissão de vibrações ah	8 m/s²
Incerteza K	1,5 m/s²



O processo de mistura do material foi realizado por meio da homogeneização dos agregados que compõem a BSM-RM-E, utilizando-se uma bandeja e uma colher de pedreiro. Posteriormente, foi incorporado o cimento, na proporção de 1% em massa, juntamente com a quantidade de água necessária para atender à relação de fluidos do material, composta pelo teor ótimo de água, teor de umidade natural do material, água presente na emulsão e teor de emulsão residual. Após essa etapa, foram adicionados os teores de emulsão de 1,8%, 2,0%, 2,2% e 2,4%, correspondentes a cada grupo de seis corpos de prova. Para aprimorar a trabalhabilidade da emulsão RM-2C, esta foi previamente aquecida à temperatura de 60°C. A Figura 11 apresenta a consistência da mistura obtida após a adição da emulsão.

Figura 11: Mistura após adição da emulsão - BSM-RM-E



Observa-se que os agregados maiores não obtiveram um bom recobrimento pela emulsão empregada. A Figura 12 apresenta os corpos de prova recebendo o procedimento de cura. Novamente, consegue-se observar que os agregados maiores não apresentam o correto recobrimento com a emulsão RM-2C utilizada no processo.

Figura 12: Procedimento de cura CP's - BSM-RM-E



Após retirada das paredes do molde



16 horas em estufa a 40°C



Após 72 horas em estufa a 40°C

Observou-se que os corpos de prova não atingiram a densidade de projeto, estabelecida em 2,024 g/cm³, apresentando densidades próximas a 1,850 g/cm³, além de alturas fora do especificado no procedimento de moldagem, limitadas a 95 mm. Conforme os procedimentos de compactação descritos no TG2 (SABITA, 2020), caso a altura e a densidade não sejam atendidas, é possível realizar a compactação em três camadas, mantendo o tempo máximo de dois minutos. Ainda assim, não foi possível atingir a densidade de projeto. Como tentativa de aprimorar o recobrimento do material, foi realizado o recorte da emulsão RM-2C; contudo, esse ajuste também não resultou em sucesso.

Outro ponto relevante refere-se à desmoldagem dos corpos de prova BSM-RM-E moldados no compactador vibratório. Durante a retirada do molde, parte do material permanecia aderida às paredes do molde tripartido. Nas primeiras moldagens, tentou-se remover o corpo de prova da base do molde logo após a compactação vibratória, mas isso resultou em sua desagregação. Posteriormente, tentou-se realizar a desmoldagem após 4 a 6 horas, removendo a base do molde, porém o corpo de prova novamente desagregava. Na terceira tentativa, verificou-se que as paredes do molde poderiam ser removidas após 4 a 6 horas, desde que o corpo de prova permanecesse na base por no mínimo 12 horas em estufa a 40°C. Ainda assim, durante o manuseio, alguns agregados apresentavam tendência a desprender-se do corpo de prova. A Figura 13 ilustra um corpo de prova rompido, evidenciando, especialmente na região destacada em vermelho, saliências causadas pelo desprendimento de agregados.

Figura 13: Rompimento ITS - BSM - RM-E



A Figura 14 apresenta os CP's da mistura BSM-RM-E em cura úmida, onde os CP's são submersos em água, com a lâmina de água no mínimo a 25 mm acima da face superior do CP. Consegue-se observar que uma certa quantidade de material se desprende dos CP's e ao manuseá-los para retirar da submersão, os mesmos soltavam alguns agregados maiores.

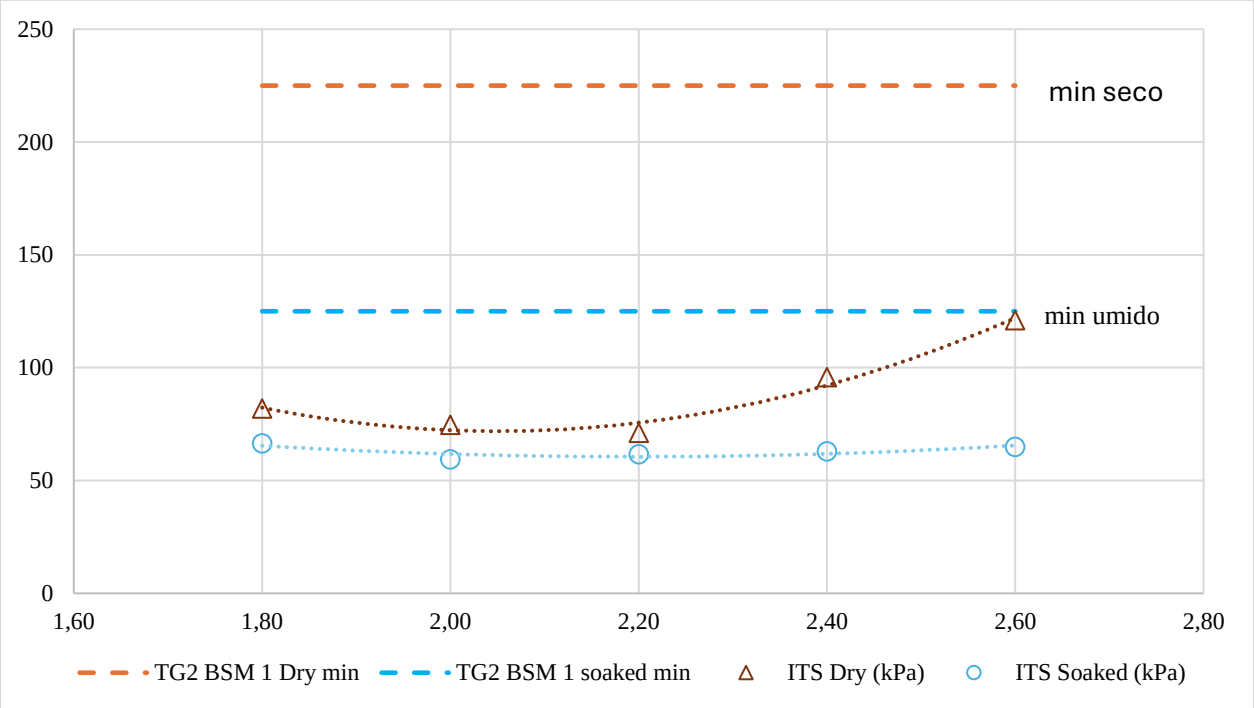
Figura 14: Cura úmida por submersão - BSM-RM-E



A Figura 15 apresenta os valores médios de resistência à tração indireta (ITS) obtidos a partir de três corpos de prova para cada teor residual avaliado. Observa-se que as curvas de ITS não atingiram os valores mínimos estabelecidos pelo TG2, que são de 225 kPa para cura seca e 125 kPa para cura úmida (SABITA, 2020). Além disso, o comportamento das curvas está em desacordo com aquele descrito na literatura (SABITA, 2020; Wirtgen Group, 2012) que geralmente apresenta uma concavidade voltada para baixo.

Embora tenha sido constatado um aumento na resistência à tração indireta com o incremento dos teores de emulsão, os valores obtidos permaneceram significativamente abaixo dos limites exigidos. Diante disso, concluiu-se pela inviabilidade do uso do método de compactação vibratória para a dosagem da mistura BSM-RM-E.

Figura 15: Resultados ITS - Compactação vibratório - BSM-RM-E



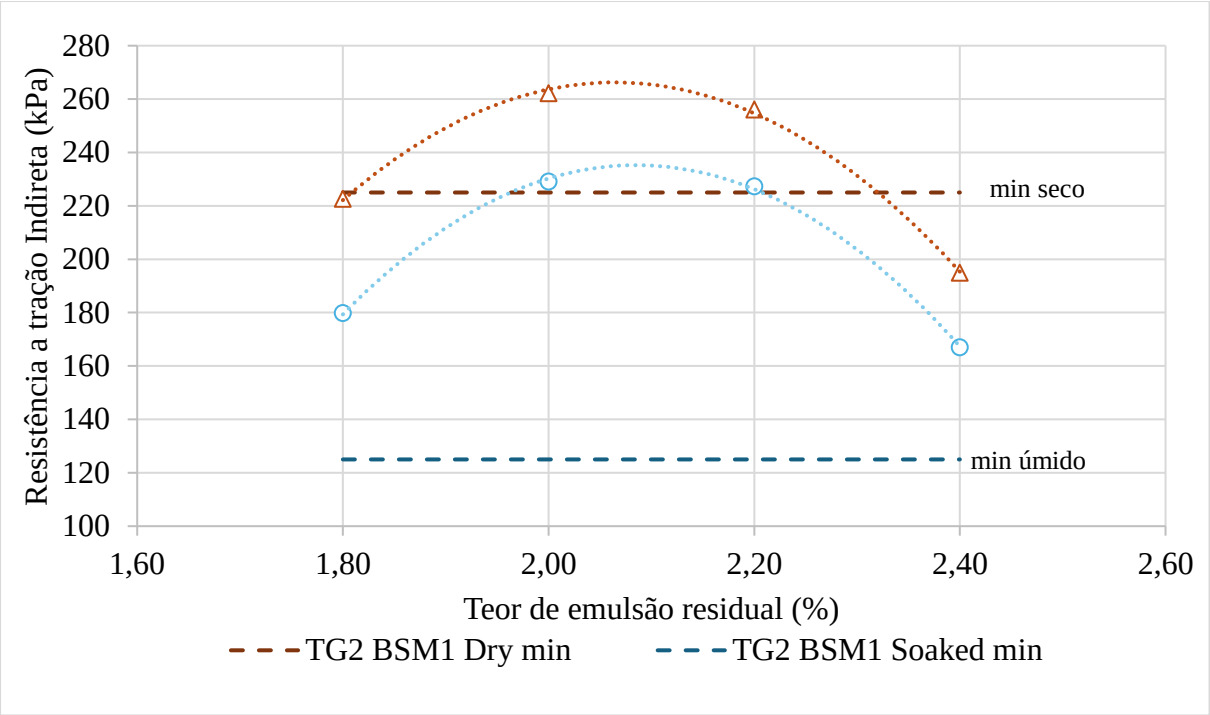
Em um segundo momento, tentou-se realizar a moldagem no compactador giratório, Figura 16.

Figura 16: Compactador Giratório



A Figura 17 apresenta os resultados da moldagem no compactador giratório. Para esse tipo de compactação conseguiu-se obter-se os valores mínimos de resistência à tração indireta. A densidade média dos CP's foi de 2,000 g/cm³, chegando mais próxima à densidade de projeto de 2,024 g/cm³. O número de giros para a compactação variou entre 70 e 193 giros, ficando em média com 113 giros.

Figura 17: Resultados ITS - compactação giratório - BSM-RM-E



Um dos objetivos do RDT era a validação do traço previamente utilizado. Contudo, mesmo após a determinação dos valores mínimos selecionados como representativos para a dosagem, optou-se pelo desenvolvimento de um novo traço, utilizando materiais distintos. Essa decisão foi motivada pelos seguintes fatores principais relacionados à impossibilidade de validação do traço do RDT intitulado "AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE MISTURAS ASFÁLTICAS COM LIGANTE MODIFICADO POR BORRACHA USINADAS A TEMPERATURAS INTERMEDIÁRIAS E DE BASES NEGRAS USINADAS COM EMULSÃO ASFÁLTICA" (ANTT, 2020):

- Divergências entre os materiais especificados no projeto e aqueles disponibilizados para o processo de validação;
- Composição granulométrica obtida considerando a granulometria do fresado após a extração do ligante asfáltico.
- Incompatibilidade entre as densidades previstas no projeto e as obtidas em laboratório durante a confecção dos corpos de prova;
- Resultados insatisfatórios de compactação ao utilizar o martelo vibratório;
- Necessidade de utilizar o método de compactação giratório como única alternativa viável para a compactação

2.5.2.2 Avaliação do comportamento de BSM com fresado não extraído e Emulsão RM-2C

Devido à necessidade de substituição da mistura BSM-RM-E, realizou-se uma nova coleta de material junto a usina da SBS em Capão do Leão, ao qual encontra-se os depósitos de material da ECOSUL. Assim, após a coleta, obteve-se uma nova composição granulométrica. Com os aprendizados obtidos na dosagem anterior, e considerando os materiais disponíveis no momento, buscou-se uma composição granulométrica que atende aos limites de trabalho impostos pelo TG2 e considerando a granulometria do fresado sem a extração do ligante asfáltico. Ou seja, o fresado foi considerado um "*black rock"*.

Assim, a mistura BSM-RM-nE, correspondente à segunda dosagem utilizada no projeto, composta por 32,0% fresado (granulometria não extraída) + Agregado Virgem, 28% de brita 1 ½" + 39,0% pó de pedra, + 1% de Cimento Portland CP-IV + Emulsão de ruptura média, RM-2C. A composição foi enquadrada nos limites estabelecidos pelo método de dosagem do TG2 (SABITA, 2020). A Figura 18 apresenta a composição granulométrica do projeto BSM-RM-nE.

O equivalente de areia para a composição BSM-RM-nE foi de 71,6%, a densidade máxima de 2,069 g/cm³ e a umidade ótima de 7,9%, obtidos no ensaio de compactação, utilizando a energia modificada. A Figura 19 apresenta a curva de compactação para o material correspondente a BSM-RM-nE. Obteve-se também o ensaio de Índice de Suporte Califórnia, onde obteve-se um ISC de 61,9% e expansão de 0,01%.

Figura 18: Composição granulométrica de projeto - BSM-RM-nE

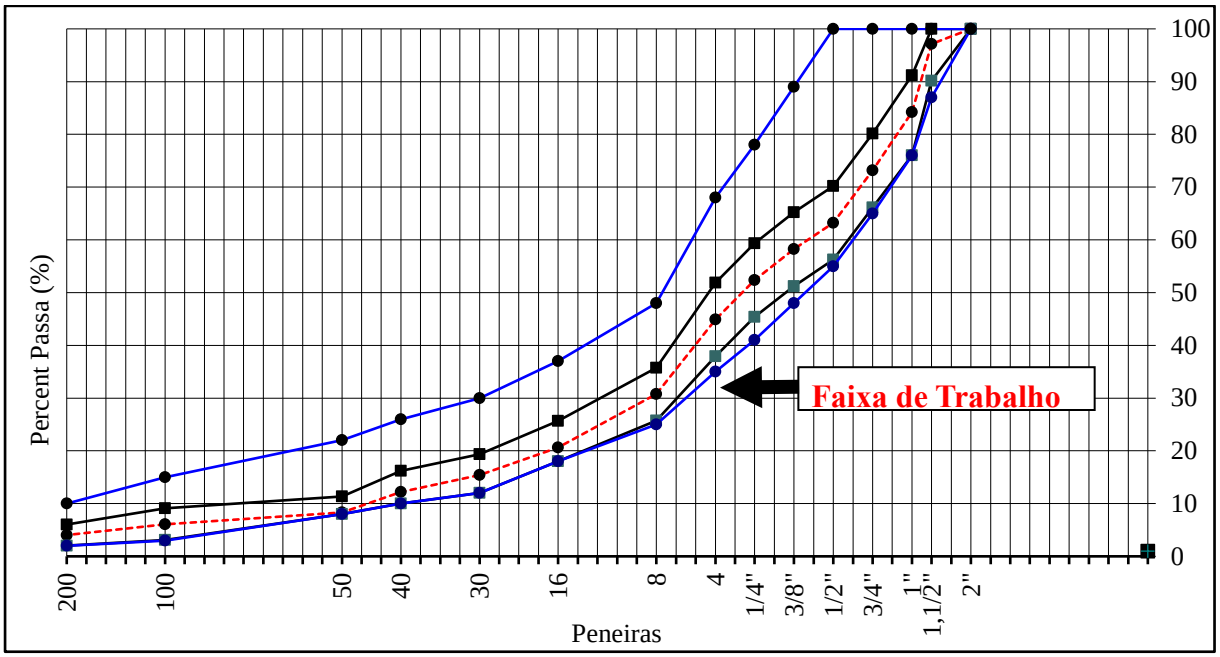
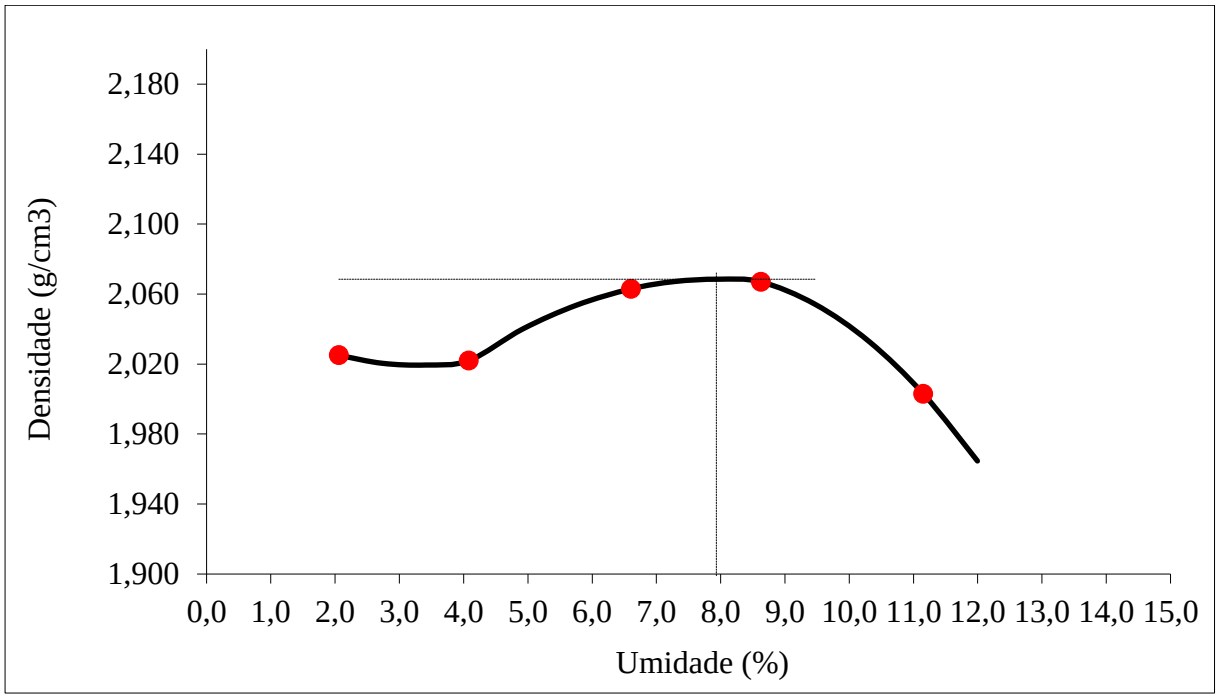
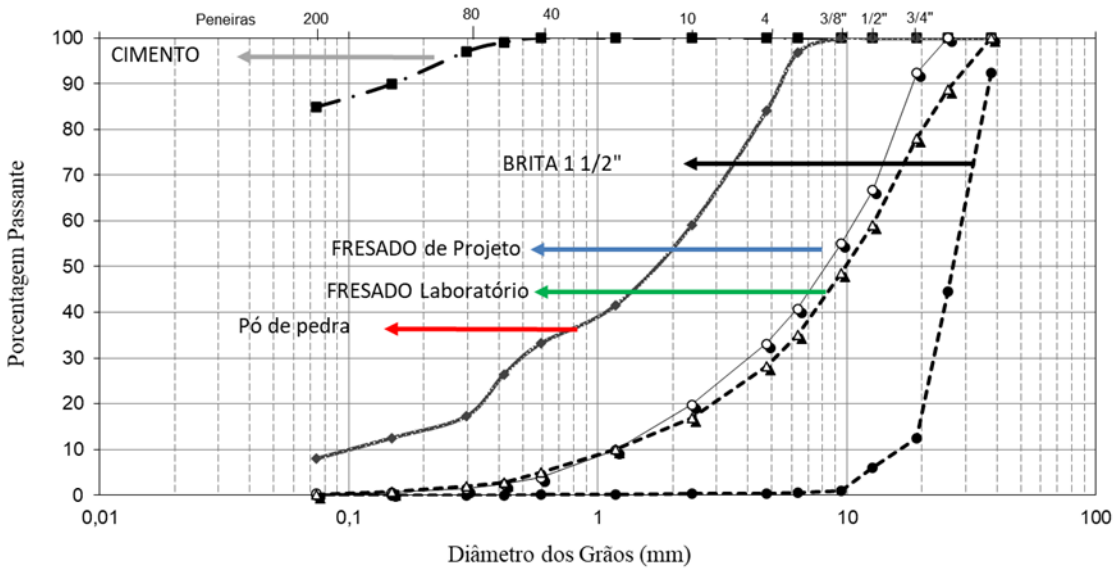


Figura 19: Curva de Compactação - BSM-RM-nE



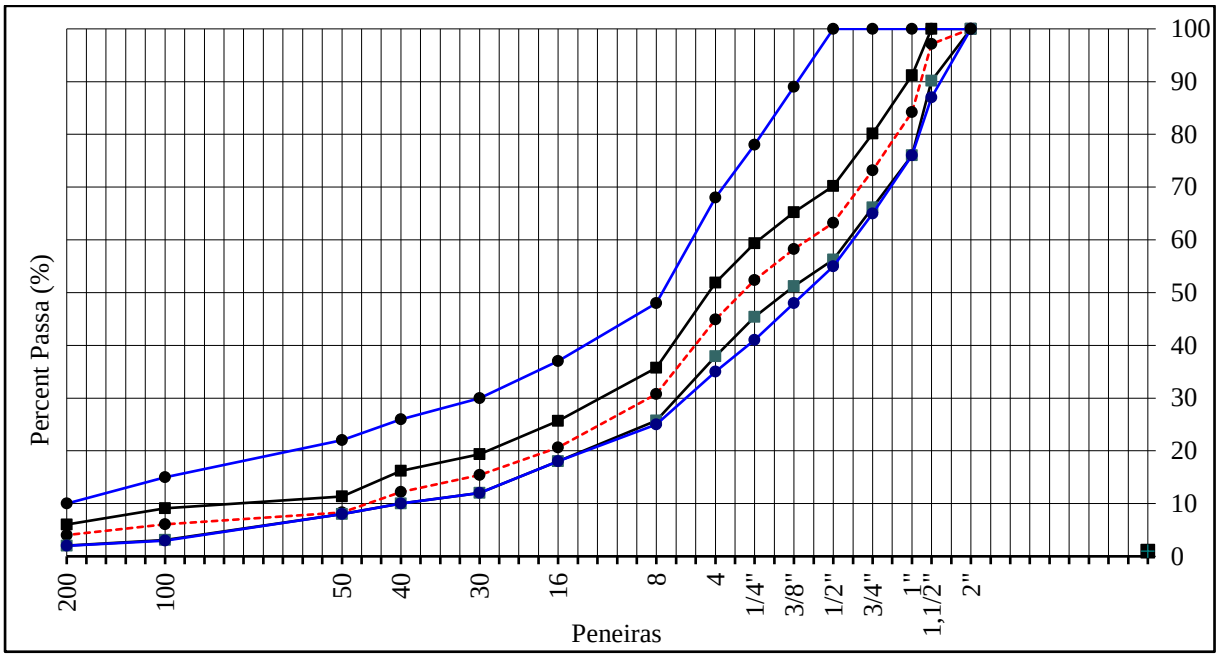
Assim como na mistura BSM-RM-E, realizou-se a conferência das granulometrias dos materiais utilizado em projeto e disponibilizados para os ensaios laboratoriais, verificando-se que eles eram compatíveis. A Figura 20 apresenta a granulometria individual dos materiais para a dosagem BSM-RM-nE.

Figura 20: Granulometria individual dos materiais - BSM-RM-nE



Mesmo apresentando uma pequena diferença na granulometria do fresado, o mesmo não chegou a modificar as porcentagens de cada fração que compõem a mistura BSM-RM-nE, ficando dentro da faixa de trabalho, como pode ser observado na Figura 21.

Figura 21: Faixa de trabalho com fresado disponível em laboratório



Com a caracterização completa dos materiais, foram iniciados os primeiros testes com o novo projeto BSM-RM-nE. Apesar de o material apresentar maior coesão e granulometria mais fina devido à adição de pó, observou-se, nos ensaios iniciais, que os agregados de maior dimensão não ficaram completamente revestidos pela emulsão asfáltica. A Figura 22 ilustra um corpo de prova após a desmoldagem, evidenciando que os agregados maiores, bem como alguns finos, permanecem sem o recobrimento adequado pela emulsão.

Figura 22: CP após cura em estufa - com frações maiores - BSM-RM-nE



Após o rompimento por resistência a tração indireta, os CP's não apresentaram valores satisfatórios. Assim, levantou-se duas hipóteses:

- Qual a influência dos agregados maiores na compactação e sua influência no tamanho do CP, que no presente momento era de 150x95mm?
- A emulsão utilizada era recomendada para a realização de misturas do tipo BSM?

2.5.2.2.1 Remoção dos agregados maiores da mistura BSM-RM-nE

Em um primeiro momento, como forma de fazer com que a compactação dos corpos de prova atingissem a densidade de projeto de 2,069 g/cm³ e melhorassem os resultados de ITS, realizou-se o escalpo da mistura BSM-RM-nE, seguindo o preconizado na norma DNIT 164/2013 - Solos – Compactação utilizando amostras não trabalhadas – Método de Ensaio (DNIT, 2013), onde a amostra representativa é passada, na peneira de 19 mm. Havendo material retido nessa peneira, deve ser procedida a substituição do mesmo por igual quantidade em massa do material passando na peneira de 19 mm e retido na peneira de 4,8 mm. Este mesmo procedimento de substituição de

material é recomendando pela NBR 6457/2016 – Amostras de solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização (ABNT, 2016).

Realizou-se o procedimento de remoção dos agregados retidos na peneira 19 mm e recomposição com material retido passante na peneira 19 mm e retido na peneira 4,8 mm. Assim, realizou-se a moldagem de corpos de prova de 95 mm de altura por 150 mm de diâmetro, em duas camadas, compactados com o compactador vibratório, com características mostradas na figura 10. Realizou-se a mistura e compactação de corpos de prova com quatro teores de emulsão residual (1,80%, 2,00%, 2,20% e 2,40%) moldando-se seis corpos de prova para cada teor. Para cada grupo de seis corpos de prova, três foram submetidos a cura seca (72horas em estufa a 40°C + 24 horas a temperatura ambiente, 25°C) e 3 corpos de prova submetidos a cura seca e úmida (72 horas em estufa a 40°C + 24 horas submersos em água a 25°C). O tempo de compactação para cada uma das camadas foi limitado a dois minutos. As características da emulsão RM-2C encontram-se na Tabela 4.

O processo de mistura do material consistiu em homogeneizar os agregados em uma bandeja com o auxílio de uma colher de pedreiro. Após, adicionou-se a taxa de cimento de 1% e a quantidade de água correspondente. Ressalta-se que para realizar uma melhor dispersão da emulsão RM-2C, era realizado o recorte da mesma. Assim, a água adicionada na mistura era descontada da água acrescida no recorte da emulsão. Realizado esse procedimento, adicionou-se a emulsão correspondente aos teores de 1,8%, 2,0%, 2,2% e 2,4%. Para auxiliar na trabalhabilidade da emulsão RM-2C, aqueceu-se a uma temperatura de 60°C. A Figura 23 apresenta a consistência da mistura após a adição da emulsão.

Figura 23: Mistura após adição da emulsão - BSM-RM-nE



Observa-se que a mistura apresenta uma aparência mais homogênea comparada as situações anteriormente relatadas. A Figura 24 apresenta os corpos de prova após a desmoldagem, após a cura em estufa e durante o rompimento. Observa-se que há um maior recobrimento pela emulsão nos agregados, podendo-se até mesmo observar um excesso de umidade logo após a desmoldagem.

Figura 24: Etapas pós moldagem - BSM-RM-nE



Após retirada das paredes do molde



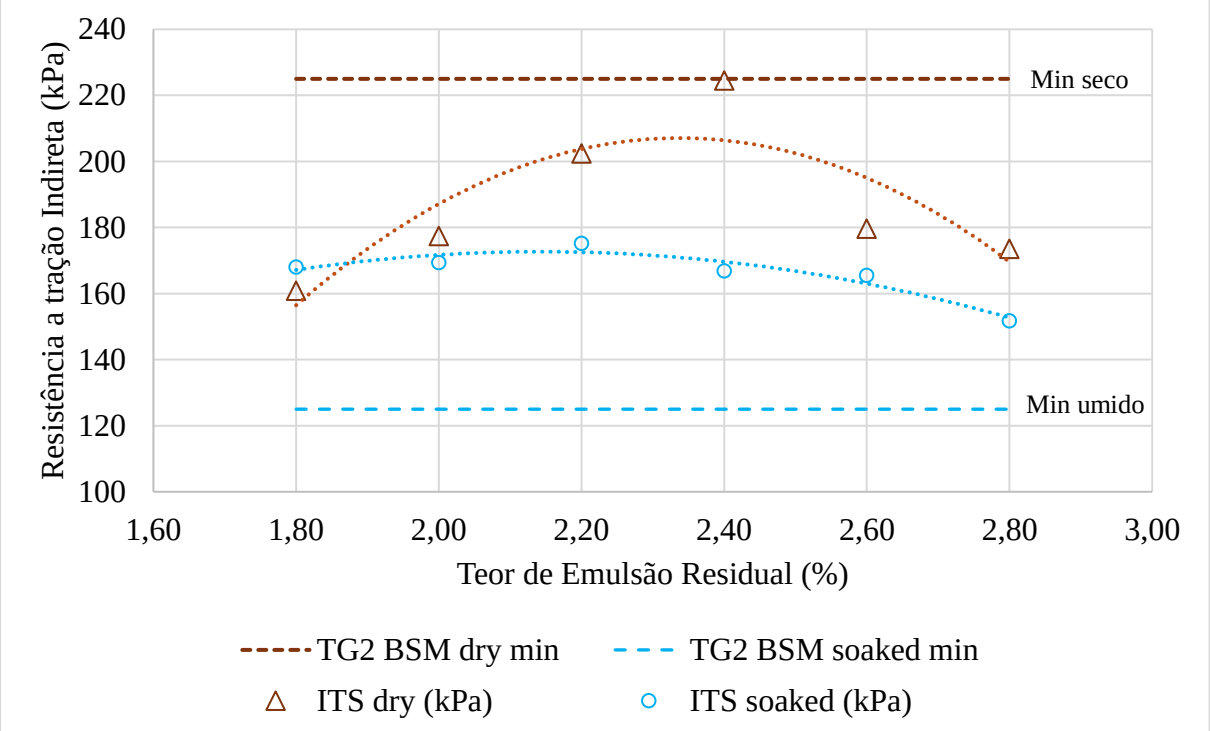
Após 72 horas em estufa a 40°C



Durante o rompimento

Destaca-se que as densidades foram atingidas, variando entre 98% e 102%, com relação à densidade de projeto de 2,069 g/cm³. Também, observa-se que na compactação dos CP's, os mesmos, liberaram bastante água misturada com agregados mais finos. A integridade dos CP's comparado com as misturas BSM-RM-E, eram muito superiores, não se desagregando com tanta facilidade. Realizados os procedimentos de cura, realizou-se o rompimento dos corpos de prova, para verificação da resistência à tração indireta, com os resultados expressos na Figura 25. Os pontos plotados no gráfico correspondem à média dos três CP's moldados para cada um dos teores de emulsão residual/cura. Observa-se nos valores apresentados na Figura 25, que não consegue-se atingir a resistência mínima preconizada no TG2 de 225 kPa (SABITA, 2020) considerando a curva de tendência obtida a partir da interação das médias das resistências a tração indireta. Somente o ponto correspondente a 2,40% de asfalto residual da emulsão que consegue atingir a resistência mínima. Quanto à cura úmida, percebe-se que que para todos os valores de emulsão residual, atingiu-se o mínimo de resistência necessária.

Figura 25: Resultado ITS - Compactação vibratório - BSM-RM-nE



Assim, novamente levantou-se a hipótese da influência da emulsão RM-2C, se ela era adequada para a realização estabilização de materiais com asfalto

2.5.2.2.2 Avaliação da Reatividade dos Agregados pelo método de Azul de Metileno

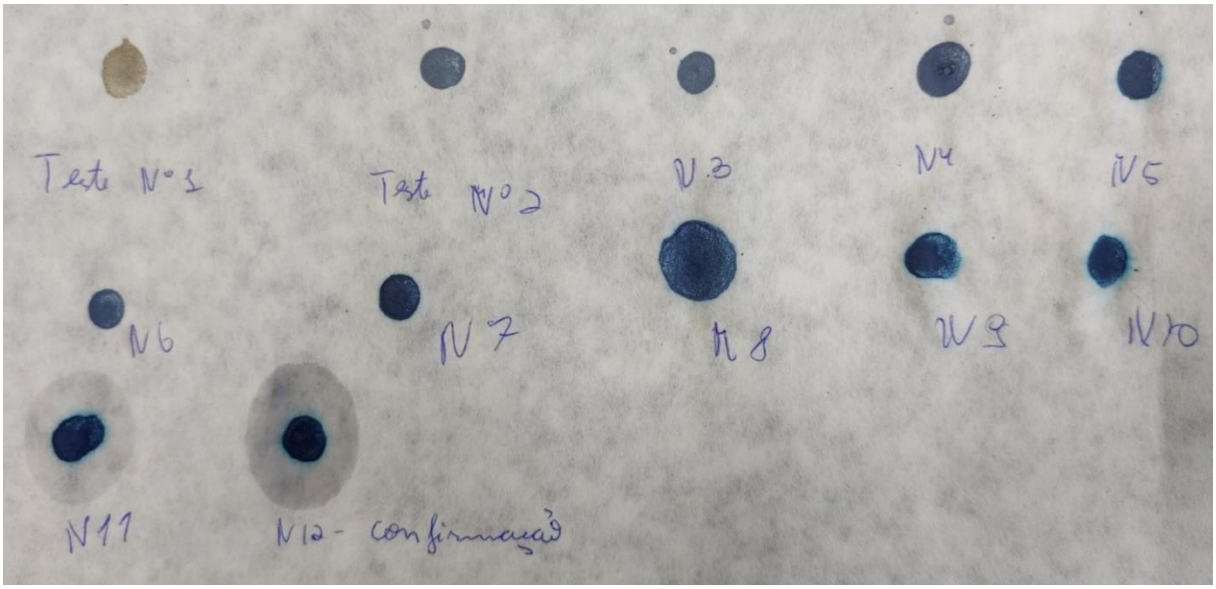
Para verificar a reatividade dos agregados, realizou-se o ensaio de azul de metileno na fração fina dos agregados virgens utilizados no presente projeto. O ensaio é realizado segundo a norma NBR 14949/2017 - Microrrevestimentos asfálticos - Caracterização da fração fina por meio da absorção de azul de metileno (ABNT, 2017).

O ensaio tem como finalidade quantificar teor de argilominerais presentes na fração passante na peneira de 75 μm, indicando a sua reatividade superficial. O ensaio, consiste em secar até massa constante uma amostra representativa do agregado. Peneirar a amostra na peneira de 75 μm. Pesar (1,00 ± 0,01) g da fração passante na peneira de 75 μm, no béquer de 250 ml. Adicionar (30,00 ± 0,01) g de água destilada ao béquer que contém a amostra e proceder a dispersão com o auxílio do agitador magnético. A solução de azul de metileno é então adicionada com o auxílio de uma bureta. Adicionar ao béquer contendo a amostra em suspensão, mantida pela agitação contínua promovida pelo agitador magnético, por meio da bureta, 0,5 ml da solução de azul de metileno e acionar o cronômetro.

Após 1 minuto, introduzir o bastão de vidro na suspensão, sem desligar o agitador magnético, retirar uma pequena porção desta suspensão e deixar pingar uma gota sobre a superfície do papel-filtro.

Observar a difusão da gota no papel-filtro e verificar o aparecimento do halo azulado em torno da borda que circula o núcleo escuro da mancha onde estão as partículas sólidas da suspensão. O ponto final da titulação é obtido quando o halo se transforma em uma iridescência e permanece azulado em um prazo mínimo de 5 min. Caso contrário, continuar a titulação com alíquotas entre 0,1 ml e 0,5 ml até que a iridescência permaneça azulada por 5 min. O resultado é expresso em mililitros da solução de azul de metileno por grama da fração fina do agregado. A Figura 26 apresenta as leituras realizadas no ensaio, onde observa-se os 12 pontos testados.

Figura 26: Ensaios de Azul de Metileno para a fração fina dos agregados virgens



A Tabela 5 apresenta os resultados dos ensaios de azul de metileno, onde o mesmo não apresenta reatividade.

Tabela 5: Resultado Ensaio azul de metileno para a fração fina dos agregados virgens

Peso do material passante na Peneira N°200 (0,075mm) =(10,0±0,05g)	10,001
Solução de ensaio contando 5,0mg de Azul de Metileno por ml de solução	5,00

Teste N°	Vs	Vs acumulado
1	0,0	0,0
2	0,5	0,5
3	0,5	1,0
4	0,5	1,5
5	0,5	2,0
6	0,5	2,5
7	0,5	3,0

$$V_{am} = \frac{C\,x\,V}{W}$$

8	0,5	3,5
9	0,5	4,0
10	0,5	4,5
11	0,5	5,0
12	0	5

Confirmação do Final do ensaio pós 5 minutos de agitação (Mld de solução Gasto) (V)	5,00
(Vam) Valor de Azul de Metileno (Mg/g)	2,50

onde:

VAM = Valor de Azul de Metileno em mg de solução por g de material menor que 75µm (Nº 200),

C = mg de Azul de Metileno /ml de solução,

V = ml de solução de Azul de Metileno necessária para titulação; e

W = gramas do material seco

2.5.2.2.3 Ensaio de adesividade Emulsão RM-2C

A fim de verificar a adesão da emulsão RM-2C foram realizados três ensaios de adesividade emulsão/agregado seguindo três diferentes procedimentos conforme as normas:

- ABNT NBR 6300: Emulsões asfálticas catiônicas - Determinação da resistência à água (adesividade) em agregados graúdos (ABNT, 2009);
- ABNT NBR 14249:2007 - Emulsão asfáltica catiônica - Determinação expedida da resistência à água (adesividade) sobre agregados graúdos (ABNT, 2007);
- ASTM D 3625:2005 - Standard Practice for Effect of Water on Bituminous-Coated Aggregate Using Boiling Water (ASTM, 2005).

Com intuito de avaliar a adesividade da emulsão para com os agregados, seguiu-se o preconizado no Manual Básico de Emulsões Asfálticas (ABEDA, 2010), onde após a análise visual, no mínimo 80% da superfície dos agregados deve estar recoberta por uma película satisfatória do asfalto residual da emulsão.

O procedimento para preparação das amostras é semelhante para os três normativas, onde:

- A amostra de agregado a ser utilizada no ensaio é obtida do material que passa na peneira de 19mm e fica retida na peneira de 12,7mm;
- A amostra é lavada e após submersa por 1 minuto, em água potável;
- Após e drenada e seca em estufa a 120°C por 2 horas.
- A emulsão RM-2C deve ser aquecida na faixa entre 50°C e 60°C.

Como se trata de uma emulsão com ruptura média, o procedimento seguido para mistura da emulsão e agregado:

- 300g de material (lavado e seco) é separado e umedecido;
- É vertido sobre os agregados 25 ± 1g de emulsão asfáltica e revolvida continuamente;
- Após a mistura é deixado repousar por1 hora, para que ocorra a ruptura da emulsão;
- Os agregados recobertos são levados para a estufa a 60°C durante 24 horas para completar a cura;
- A amostra é retirada da estuda e aguardado que atinja a temperatura ambiente;

Após esses procedimentos, os demais passos executados com as amostras diferenciam-se de acordo com cada norma seguida.

O ensaio de adesividade seguindo a norma NBR 6300 Emulsões asfálticas catiônicas - Determinação da resistência à água (adesividade) em agregados graúdos (ABNT, 2009), realiza o procedimento final colocando a amostra recoberta pela emulsão, após o resfriamento, em um béquer com 400mL de água. O béquer é colocado em estufa a 40°C, por um período de 72 horas. A Figura 27 apresenta o resultado visual após a cura de 72 horas. Observa-se que o recobrimento da emulsão nos agregados corresponde a 100%.

Figura 27: Resultado ensaio de adesividade - Emulsão RM-2C - NBR 6300:2009



Para o ensaio de adesividade seguindo o procedimento da NBR 14249 - Emulsão asfáltica catiônica - Determinação expedida da resistência à água (adesividade) sobre agregados graúdos (ABNT, 2007), após o resfriamento, a amostra é colocada em um cesto e imergido em um béquer contendo água em ebulição, mantendo-o por 3 minutos após o início da ebulição. Após retirar o cesto contendo os agregados, o mesmo, é lavado em água corrente e espalhado em uma placa para a análise do recobrimento. A Figura 28 apresenta o resultado visual após 3 minutos de fervura e lavagem da amostra, onde 98% da superfície é recoberta pelo asfalto residual da emulsão.

Figura 28: Resultado ensaio de adesividade - Emulsão RM-2C - NBR 14249:2007



Para o ensaio de adesividade seguindo o procedimento da norma D3625 - Standard Practice for Effect of Water on Bituminous-Coated Aggregate Using Boiling Water (ASTM, 2005), após o resfriamento, a amostra é colocada em um cesto e imergido em um béquer contendo água destilada em ebulição, mantendo-o por 10 minutos após o início da ebulição. Após a fervura, o agregado é resfriado a temperatura ambiente e colocado sobre uma superfície branca para a realização da análise visual. Na Figura 29 apresenta-se o resultado visual após 10 minutos de fervura e lavagem das amostras. Pode-se observar, que há alguns pequenos pontos onde a emulsão não recobre o material, correspondendo a 95% da superfície recoberta pelo asfalto residual da emulsão.

Figura 29: Resultado ensaio de adesividade - Emulsão RM-2C - ASTM D3625:2005



2.5.2.3 Avaliação do comportamento de BSM com emulsão EARP

Após a avaliação dos dados para a mistura da BSM-RM-nE, demonstrada no item anterior, os resultados obtidos não atenderam aos níveis mínimos estabelecidos pelo TG2 para cura seca, que exige uma resistência à tração indireta (RTI) de pelo menos 225 kPa. Considerando as hipóteses de possíveis fatores que influenciam o desempenho da mistura, além da remoção dos agregados retidos na peneira de 19 mm e sua recomposição, avaliou-se que a emulsão asfáltica utilizada poderia ser substituída para verificar sua influência no comportamento da mistura.

Nesse contexto, selecionou-se uma nova emulsão, adquirida da Ecosul, com especificações específicas para reciclagem profunda. A emulsão escolhida foi a EARP. Para a terceira rodada de moldagens, utilizou-se a mesma composição da mistura BSM-RM-nE, com exceção da substituição da emulsão RM-2C pela emulsão EARP. Assim, essa nova formulação foi denominada BSM-EARP-nE, correspondente à segunda dosagem, mas com a troca de emulsão.

A dosagem foi composta por 32,0% de material fresado (granulometria não extraída) + agregado virgem, 28,0% de brita 1 ½", 39,0% de pó de pedra, 1,0% de cimento Portland CP-IV e emulsão EARP. Essa composição atendeu aos limites estabelecidos pelo método de dosagem TG2 (SABITA, 2020). A Figura 18, apresentada no item anterior, exibe a curva granulométrica correspondente ao projeto de composição. Os demais parâmetros permaneceram inalterados em

relação à mistura anterior. Peso específico seco máximo de 2,069 g/cm ³, umidade ótima de 7,9%, equivalente de areia de 71,6%, ISC de 61,9% e expansão de 0,01%.

Comparando as emulsões RM-2C com a emulsão EARP, ela é menos viscosa, sendo a sua dispersão facilitada devido a essa propriedade. A Tabela 6 apresenta os dados referentes a emulsão utilizada na dosagem BSM-EARP-nE, fornecidos pela empresa fornecedora da emulsão asfáltica.

Tabela 6: Características emulsão EARP

Ensaios sobre a emulsão	Método de ensaio IBP / ABNT	ESPECIFICAÇÃO		Resultado
		Mínima	Máxima	
Viscosidade Saybolt Furol, 50 C, s	NBR 14491	-	70	26
Sedimentação, 5 dias, % peso	NBR 6570	-	5	1,4
Peneiração, retido, 0.84mm, % peso	NBR 14393	-	0,1	0,01
Carga de partícula	NBR 6567	Positiva	-	Positiva
Resíduo Seco, % peso	NBR 14376	58	-	58,8

Fonte: Adaptado de GREGA Asfaltos (2023)

Para a mistura e compactação dos corpos de prova da dosagem mistura BSM-EARP-nE, primeiramente realizou-se a remoção dos agregados retidos na peneira 19 mm e realizada a recomposição. Foi realizada a compactação de corpos de prova de 95 mm de altura por 150 mm de diâmetro, em duas camadas, compactados com o compactador vibratório, com características apresentadas na Figura 10. Realizaram-se misturas com quatro teores de emulsão residual (1,80%, 2,00%, 2,20% e 2,40%), moldando-se seis corpos de prova para cada teor. Para cada grupo de seis corpos de prova, três foram submetidos à cura seca (72horas em estufa a 40°C + 24 horas a temperatura ambiente, 25°C) e 3 corpos de prova submetidos à cura seca e úmida (72 horas em estufa a 40°C + 24 horas submersos em água a 25°C). O tempo de compactação para cada uma das camadas foi limitado a dois minutos. Em média, o tempo de compactação permaneceu entre 50 segundos e 60 segundos, sendo utilizada a potência 4 do martelo vibratório.

Misturou-se cada corpo de prova separadamente, onde, primeiramente, realizou-se a homogeneização dos agregados, em uma bandeja, com o auxílio de uma colher de pedreiro. Após,

adicionou-se a taxa de 1% de cimento e a quantidade de água correspondente. Devido a emulsão ser mais fluida, não se realizou o recorte da emulsão. Assim, após a homogeneização dos agregados, cimento e água, adicionou-se a quantidade de emulsão correspondente. A Figura 30 apresenta a BSM após a adição da emulsão. Pode-se observar que os agregados ficaram completamente recobertos pela emulsão, sendo que a mistura apresenta uma boa consistência e trabalhabilidade.

Figura 30: BSM-EARP-nE - após adição da emulsão para as taxas de 1,8% e 2,0% de emulsão residual



Mistura após adição de 1,8% de emulsão residual



Mistura após adição de 2,0% de emulsão residual

A Figura 31 apresenta um exemplar da Mistura BSM-EARP-nE após a remoção das paredes do molde, após cura em estufa a 40°C e durante o rompimento. Observa-se que a coloração do CP é bem mais escura, frente aos CP's apresentados nas situações anteriores. Os agregados ficaram bem recobertos pela emulsão.

Figura 31: Etapas de desmoldagem, cura e rompimento - BSM-EARP-nE



Após retirada das paredes do molde



Após 72 horas em estufa a 40°C



Durante o rompimento

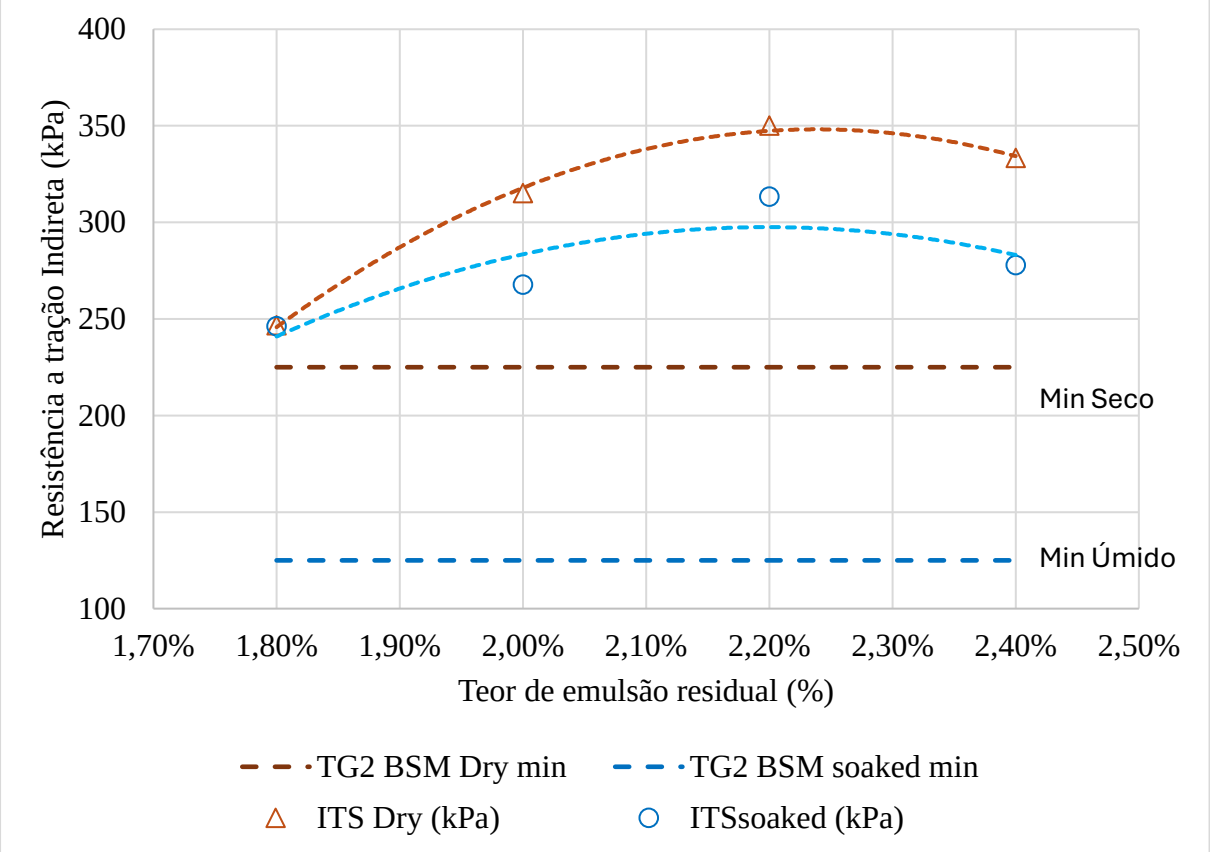
A Figura 33 apresenta os CP's em cura úmida, onde os mesmos são submersos por 24 horas à temperatura ambiente de 25°C. Pode-se observar que mesmo submersos os CP's permanecem estáveis, com algumas pequenas partículas sendo desprendidas.

Figura 32: Cura úmida BSM-EARP-nE



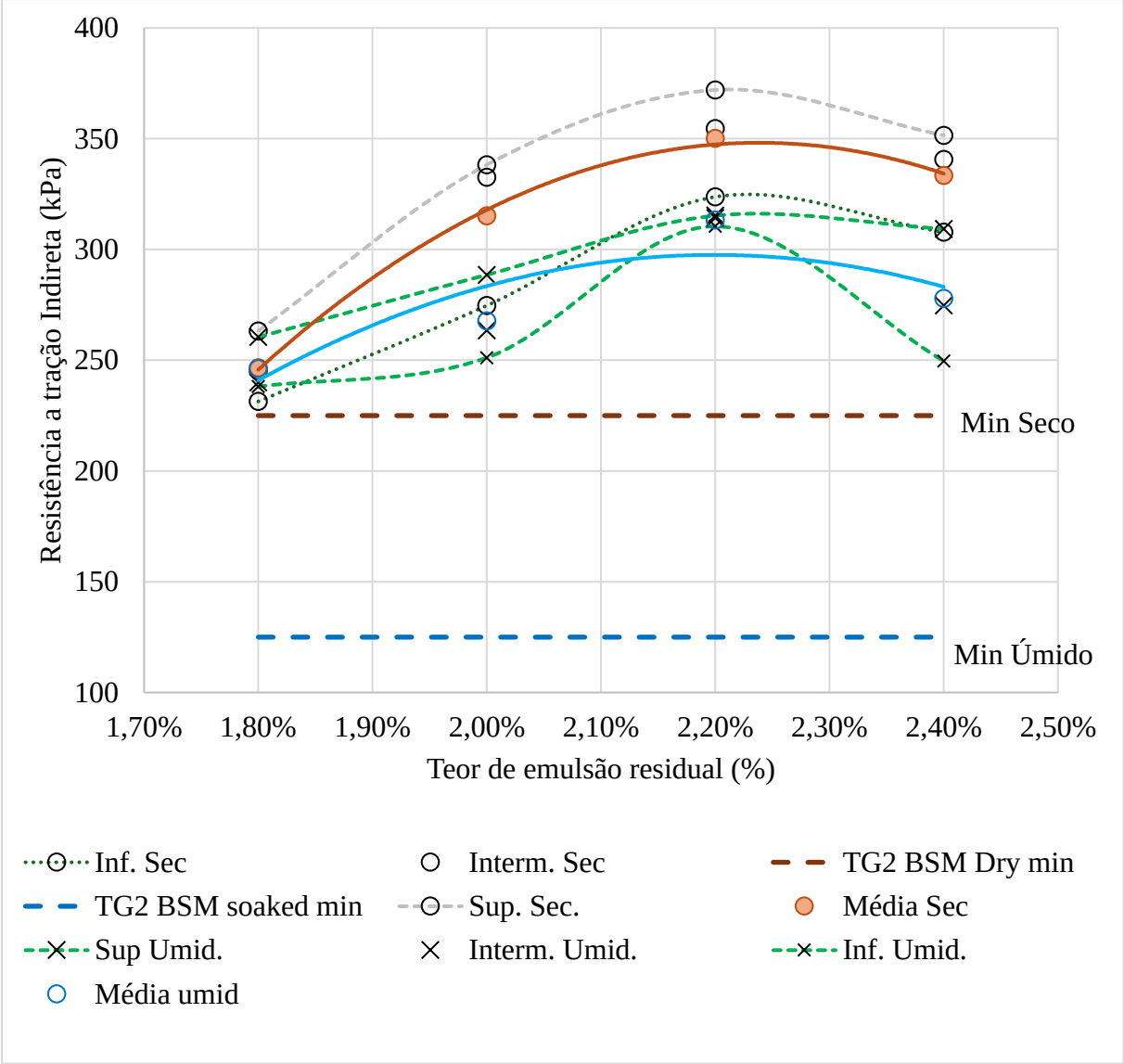
Destaca-se que as densidades propostas em projeto foram atingidas, com grau de compactação variando entre 98% e 102%. A integridade dos corpos de prova foi superior aos demais casos analisados, contudo o seu manuseio requer cuidado, principalmente quando retirados da base do molde logo após a compactação. A Figura 33 apresenta os resultados das médias dos rompimentos dos CP's para a resistência à tração indireta. Observa-se que houve um ganho significativo de resistência à tração indireta comparado às demais situações analisadas anteriormente, demonstra-se que a troca da emulsão foi substancialmente responsável pelo ganho de resistência. Tanto para as situações de cura seca e úmida, houve um ganho expressivo de resistência à tração indireta. Para o teor de 1,8% as médias dos CP's de cura seca e úmida foram muito semelhantes. Para todos os casos, mesmo em cura úmida, o material atingiu uma resistência superior a cura mínima seca delimitada pelo TG2.

Figura 33: Resultados Medias ITS - BSM-EARP-nE



A Figura 34 apresenta os resultados considerando os resultados individuais de resistência a tração indireta para cada um dos três corpos de prova considerando os diferentes teores de asfalto residual da emulsão. Observa-se que há uma dispersão entre as resistências dos CP's, mesmo dentro de um mesmo teor de asfalto residual da emulsão. Os limites inferiores e superiores criados a partir de linhas de tendência também foram verificados no TG2 (SABITA, 2020). Conforme indica o TG2, o limite inferior é utilizado como balizador para definição do teor de emulsão residual a ser utilizado na definição do teor de projeto.

Figura 34: Resultados ITS - BSM-EARP-nE



Seguindo o preconizado no TG2 (SABITA, 2020), o teor de projeto em 1,80% de emulsão residual. Isso deve-se que, tanto para os limites de resistência a tração indireta seca de 225 kPa e 125 kPa para úmido, o teor de 1,80% já atenderia as resistências mínimas. Contudo, ao apresentar-se os resultados para os representantes da Ecosul, considerando que a partir desses valores, seria desenvolvido todo o restante do projeto, bem como a construção das Pistas experimentais, definiu-se que o teor de projeto adotado seria de 2,0% de emulsão residual com utilização das características da mistura BSM-EARP-nE.

2.5.2.3.1 Ensaio de adesividade EARP

A fim de verificar a adesão da emulsão EARP realizou-se três ensaios de Adesividade emulsão/agregado seguindo três diferentes procedimentos conforme as normas:

- NBR 6300 - Emulsões asfálticas catiônicas - Determinação da resistência à água (adesividade) em agregados graúdos (ABNT, 2009);
- NBR 14249 - Emulsão asfáltica catiônica - Determinação expedida da resistência à água (adesividade) sobre agregados graúdos (ABNT, 2007);
- D 3625 - Standard Practice for Effect of Water on Bituminous-Coated Aggregate Using Boiling Water (ASTM, 2005).

A fim de avaliar a adesividade da emulsão para com os agregados, seguiu-se o preconizado no Manual Básico de Emulsões Asfálticas (ABEDA, 2010), onde após a análise visual, no mínimo 80% da superfície dos agregados deve estar recoberta por uma película satisfatória do asfalto residual da emulsão.

O procedimento para preparação das amostras é semelhante para os três procedimentos, onde:

- A amostra de agregado a ser utilizada no ensaio é obtida do material que passa na peneira de 19mm e fica retida na peneira de 12,7mm;
- A amostra é lavada e após submersa por 1 minuto, em água potável;
- Após e drenada e seca em estufa a 120°C por 2 horas.

Como se trata de uma emulsão com ruptura lenta, o procedimento seguido para mistura da emulsão e agregado seguido foi:

- 300g de material (lavado e seco) é separado e umedecido;

- É vertido sobre os agregados 25 ± 1g de emulsão asfáltica e revolvida continuamente;
- Após a mistura é deixado repousar por1 hora, para que ocorra a ruptura da emulsão;
- Os agregados recobertos são levados para a estufa a 60°C durante 24 horas para completar a cura;
- A amostra é retirada da estuda e aguardado que atinja a temperatura ambiente;

Os demais passos executados com as amostras diferenciam-se de acordo com cada norma seguida. O ensaio de adesividade seguindo a norma NBR 6300 Emulsões asfálticas catiônicas - Determinação da resistência à água (adesividade) em agregados graúdos (ABNT, 2009), realiza o procedimento final colocando a amostra recoberta pela emulsão, após o resfriamento, em um béquer com 400 ml de água. O béquer é colocado em estufa a 40°C, por um período de 72 horas. A **Figura 35** apresenta o resultado visual após a cura de 72 horas. Observa-se que o recobrimento da emulsão nos agregados corresponde a 95%, ficando acima limite mínimo da aceitação preconizado pelo Manual Básico de Emulsões Asfálticas (ABEDA, 2010).

Figura 35: Resultado ensaio de adesividade - Emulsão EARP - NBR 6300



Para o ensaio de adesividade seguindo o procedimento da NBR 14249- Emulsão asfáltica catiônica - Determinação expedida da resistência à água (adesividade) sobre agregados graúdos(ABNT, 2007), após o resfriamento, a amostra é colocada em um cesto e imergido em um béquer contendo água em ebulição, mantendo-o por 3 minutos após o início da ebulição; após retirar o cesto contendo os agregados, o mesmo é lavado em água corrente e espalhado em uma placa para a análise do recobrimento. A Figura 36 apresenta o resultado visual após 3 minutos de fervura e lavagem da amostra. Observa-se que o recobrimento da emulsão nos agregados corresponde a 92%, ficando acima limite mínimo da aceitação preconizado pelo Manual Básico de Emulsões Asfálticas (ABEDA, 2010).

Figura 36: Resultado ensaio de adesividade - Emulsão EARP - NBR 14249:2007



Para o ensaio de adesividade seguindo o procedimento da norma ASTM D3625 Standard Practice for Effect of Water on Bituminous-Coated Aggregate Using Boiling Water (ASTM, 2005), após o resfriamento, a amostra é colocada em um cesto e imergido em um béquer contendo água destilada em ebulição, mantendo-o por 10 minutos após o início da ebulição. Após a fervura, o agregado é resfriado à temperatura ambiente e colocado sobre uma superfície branca para a realização da análise visual. A Figura 37 apresenta o resultado visual após 10 minutos de fervura e lavagem da amostra. Observa-se que o recobrimento da emulsão nos agregados corresponde a 90%, ficando dentro do limite mínimo da aceitação preconizado pelo Manual Básico de Emulsões Asfálticas (ABEDA, 2010).

Figura 37: Resultado ensaio de adesividade - EARP - ASTM D3625:2005



2.5.3 Etapa de campo

Na etapa de campo, foram realizados os processos de execução de duas pistas experimentais previstas no projeto, que serão avaliadas ao longo de sua implementação. Também foram conduzidas as primeiras análises utilizando os equipamentos Light Weight Deflectometer (LWD) e Falling Weight Deflectometer (FWD).

Uma das pistas experimentais foi construída na rodovia BR-116/RS, no km 495, enquanto a outra, denominada Pista F, foi executada no Laboratório de Pavimentação da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (LAPAV-UFRGS). Ambas seguiram a dosagem BSM-EARP-nE, composta por: 32,0% de fresado (granulometria não extraída) + agregado virgem, 28,0% de brita 1 ½", 39,0% de pó de pedra, 1,0% de cimento Portland CP-IV, e 2,0% de teor residual da emulsão EARP.

O teor de umidade de projeto foi estabelecido em 7,9%, enquanto a densidade máxima obtida nos ensaios de compactação em laboratório, utilizando energia modificada, foi de 2,069 g/cm³.

A construção da pista experimental na BR-116/RS incluiu a fresagem de 18 cm de material existente, seguido pela recomposição da estrutura com 13 cm de BSM e 5 cm de revestimento. A Pista F foi construída como uma nova estrutura no LAPAV-UFRGS, utilizando material transportado da usina localizada em Capão do Leão/RS para Porto Alegre/RS.

Observações sobre o Fresado Utilizado: O fresado removido do trecho experimental da BR-116/RS km 495 não foi utilizado no processo de reciclagem. Em vez disso, o fresado empregado nas misturas estava previamente estocado na usina da SBS Engenharia, proveniente de outros processos de fresagem realizados pela Ecosul.

Adicionalmente, constatou-se pequenas variações na granulometria do fresado em relação ao especificado no projeto e na dosagem, uma vez que o material foi enviado ao LAPAV em setembro de 2022.

2.5.3.1 Construção Pista Experimental – BR-116/RS km 495

Aos cinco dias do mês de janeiro de 2023, foi executada, na BR-116/RS km 495+320 ao km 495+560, na faixa direita, no sentido Porto Alegre/RS a Pelotas/RS, o trecho experimental a ser acompanhado ao longo da execução do presente RDT. O local foi determinado pela concessionária

Ecosul após realização de levantamento deflectométrico com viga Benkelman, onde constatou-se a necessidade de intervenção no trecho executado. A Tabela 7 apresenta as deflexões para o trecho executado antes da intervenção.

O projeto BSM utilizado para a execução do trecho experimental, foi definido pela dosagem em laboratório, e correspondeu a BSM-EARP-nE, utilizando a emulsão EARP, com 2,0% de teor residual, e 1% de cimento. A BSM foi usinada na usina da SBS Engenharia na cidade de Capão do Leão-RS e transportado até o local de execução situado a aproximadamente 50 km da usina. Destaca-se que por se tratar de um material nunca utilizado, teve-se receio quanto ao transporte do mesmo, pois temia-se que a emulsão não aderida ao material, poderia escorrer. A Figura 38 apresenta o trecho onde será executado o trecho experimental.

Tabela 7: Deflexões trecho experimental BR-116/RS - antes intervenção

Deflexões					
Rodovia BR-116/RS	Data	30/08/2022	Lado: LD	Constante	2,011
Estacas / KM	Leitura Inicial	Leitura Final	Obturações	Cálculo da deflexão ANTES	Temp. ºC
495+320	500	460	40	80,4	29,0
495+360	500	435	65	130,7	29,0
495+400	500	460	40	80,4	29,0
495+440	500	445	55	110,6	25,0
495+480	500	465	35	70,4	25,0
495+520	500	455	45	90,5	25,0
495+560	500	450	50	100,6	25,0

Figura 38: Trecho BR-116/RS km 495 antes da intervenção



2.5.3.1.1 Usinagem de transporte BSM

No dia anterior à execução do trecho experimental da BR-116/RS, realizou-se a calibração da usina. A calibração foi necessária, pois, como o material nunca havia sido executado, era necessário realizar o ajuste na bomba de emulsão, bem como nos silos de materiais, em acordo ao projeto BSM-EARP-nE. A usinagem do material ocorreu no dia da execução do trecho experimental da BR-116/RS. A Figura 39 apresenta a usina utilizada para a execução da usinagem do material.

Figura 39: Usina se Solos SBS engenharia - Capão do Leão/RS



A usina, é composta por três silos para agregados, onde depositou-se o fresado, pó de pedra e brita 1 ½". Os agregados, são conduzidos por uma esteira horizontal, onde é adicionado o cimento. A esteira de elevação, leva o material até o misturador, onde é adicionado a água e a emulsão. A Figura 40 apresenta os silos com material, a esteira horizontal e de elevação.

Figura 40: Etapas de usinagem BSM



Silos de material



Esteira Horizontal



Esteira de elevação até o misturador

A Figura 41 apresenta o processo de mistura dos agregados mais os fluidos. Ao chegar no misturador, são adicionadas a água e a emulsão. Para a adição de emulsão, calibrou-se a bomba, considerando a capacidade de bombeamento e tempo necessário para a produção de 100t/hora. No final do processo, tem-se a BSM pronta para transporte.

Figura 41: Etapas de mistura BSM em usina



Material chegando ao misturador | Adição da emulsão e água | BSM misturada

Após a mistura, os caminhões basculantes eram carregados e destinados para a obra. A Figura 42 apresenta a emulsão usinada logo após ser carregada, bem como um caminhão de transporte carregado.

Figura 42: BSM usinada e transporte



BSM usinada | Transporte BSM

2.5.3.1.2 Execução Trecho Experimental

O trecho experimental foi construído a partir da remoção por fresagem de 18cm de pavimento ao longo de aproximadamente 200m (km 495+320 ao km 495+560), na faixa pesada da pista sentido Porto Alegre/Pelotas. A solução de reciclagem empregada em questão foi do tipo *in plant*, onde usinou-se o material e transportou-se o mesmo até a pista. No trecho, executou-se uma camada de 13 cm de BSM + 5 cm de revestimento. Devido a não se ter uma convenção sobre o tempo para

cura inicial para a liberação do tráfego e como havia a possibilidade de deixar o trecho em questão com a faixa fechada ao tráfego, a camada de revestimento do tipo GAP-graded, foi executada 4 dias após a execução da BSM. A decisão de deixar a base de BSM sem o revestimento e sem o tráfego por 4 dias, também foi justificado, por não saber o comportamento da emulsão EARP em campo. A Figura 43 apresenta o processo de fresagem, fundo da caixa e pintura de ligação do trecho experimental.

Figura 43: Preparação caixa pista experimental BR-116/RS km 495



Assim, logo após, foi realizado a espalhamento da BSM com o auxílio de vibroacabadora. Foram executados 13 cm de BSM ao longo de todo o trecho fresado. Logo após, foi realizada a compactação com dois rolos lisos realizando aproximadamente 8 fechas. A Figura 44 apresenta o processo de espalhamento do material e compactação.

Figura 44: Execução Pista experimental BR-116/RS - km 495



Após finalizada a compactação, a superfície ficou com uma aparência úmida, como pode ser observado na Figura 45.

Figura 45: Superfície BSM Após a compactação



Quatro dias após a execução da base em BSM, realizou-se a execução de uma camada de 5 cm de GAP. A figura a seguir, mostra como ficou a superfície da BSM, após 4 dias em cura e após como ficou o trecho finalizado com o revestimento finalizado.

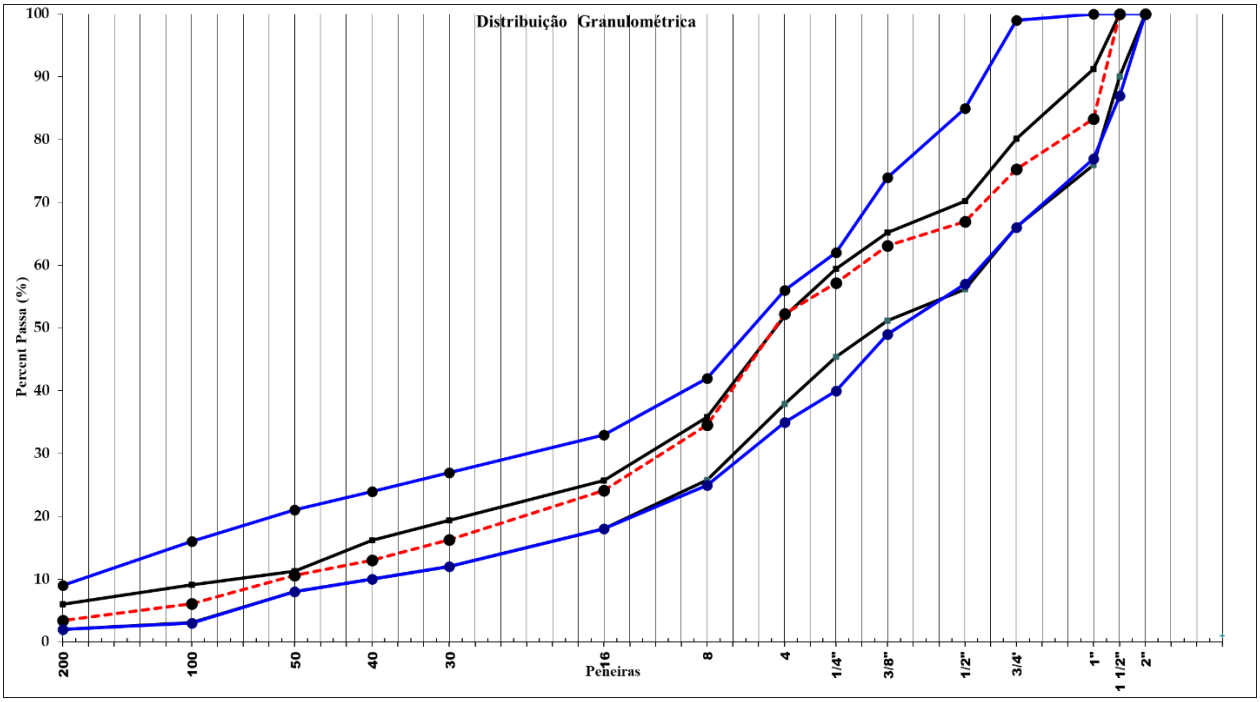
Figura 46: BSM após 4 dias e revestimento finalizado



2.5.3.1.3 Ensaios laboratoriais e de campo pista experimental BR-116/RS km 495

Com o objetivo de monitorar a pista experimental executada, foram realizados ensaios em campo e laboratório pela equipe da Ecosul. Ainda na usina, procedeu-se à verificação da granulometria da mistura, por meio da coleta e análise do material correspondente a um metro de correia transportadora. A Figura 47 apresenta a curva granulométrica do material aplicado no trecho experimental da BR-116/RS, localizado no km 495.

Figura 47: Distribuição granulométrica BSM aplicada BR-116/RS km 495



Após a usinagem no material, uma amostra de material usinado foi coletada e moldado um corpo de prova para realização do ensaio de ISC. O corpo de prova foi moldado no dia 06/01/23 e rompido no dia 09/01/23. A umidade de compactação 7,6%, densidade máxima obtida de 2,061g/cm³, ISC 79,7% e expansão de 0,01%.

Em campo, para verificar a compactação do material, foi realizado o ensaio de determinação da massa específica aparente, *in situ*, com o emprego do frasco de areia DNER-ME 092: Solo-determinação da massa específica aparente "in situ", com emprego ido frasco de areia (DNER, 1994). A realização do ensaio ocorreu no dia 08/01/23. Realizaram-se três pontos de ensaio, obtendo-se um grau de compactação de 98,8%, 98,0% e 100,3%. A Figura 48 apresenta um colaborador da Ecosul executando o ensaio. Também pode-se ser o fundo do furo, mostrando como ficou o material após a cura. Destaca-se que a abertura do furo para realizar o ensaio foi difícil, pois o material já apresentava uma elevada rigidez. O ANEXO I apresenta a planilha do ensaio de frasco de areia para a pista experimental BR-116/RS km 495.

Figura 48: Ensaio de frasco de areia



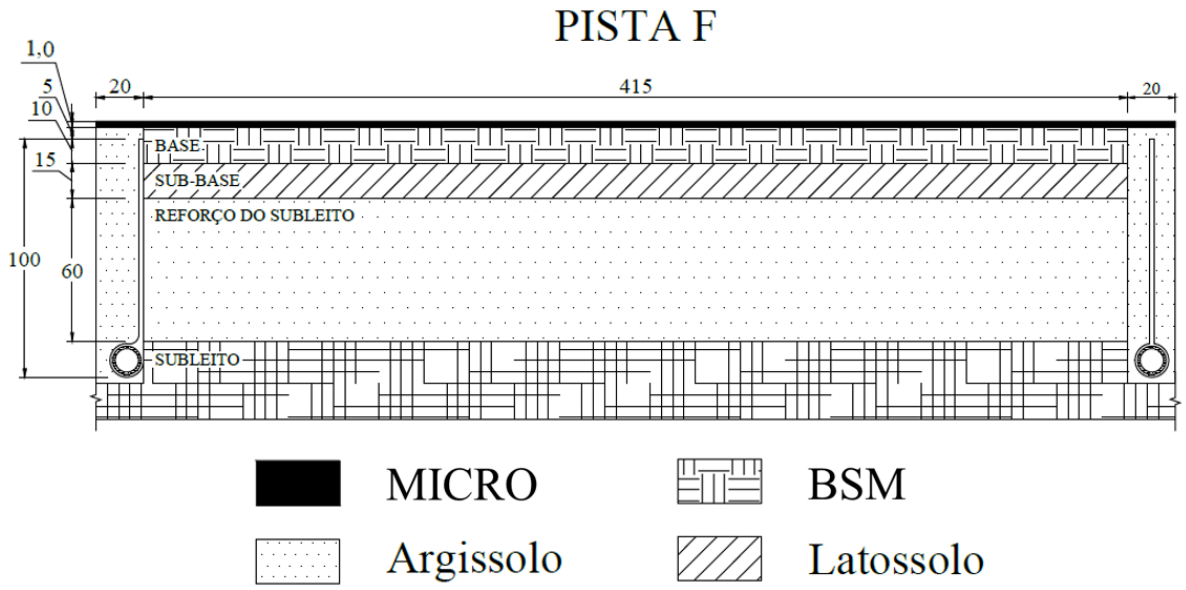


2.5.3.2 Execução Pista F – LAPAV

No dia 10 de janeiro de 2023, foi executada a camada de BSM na pista experimental do LAPAV. A construção dessa pista tem como objetivo avaliar os efeitos de deformação permanente em escala real, utilizando um simulador de tráfego. A pista, denominada Pista F, foi construída em parceria entre o LAPAV e a Rede de Tecnologia de Asfaltos (RTA) da Petrobras.

Por se tratar de uma pista experimental, sua execução foi realizada com o máximo rigor técnico. A estrutura da pista é composta pelas seguintes camadas: 60 cm de argissolo como reforço do subleito, 15 cm de latossolo na sub-base, 15 cm de BSM na base, e 1,0 cm de microrrevestimento asfáltico como revestimento. A Figura 49 ilustra as camadas que compõem a Pista F, indicando também as respectivas espessuras.

Figura 49: Camadas Pista F



2.5.3.2.1 Execução BSM – Pista F

A execução da Pista F no LAPAV ocorreu no dia 10 de janeiro de 2023. A BSM foi usinada na usina da SBS Engenharia em Capão do Leão – RS, nas primeiras horas da manhã e transportada até o LAPAV localizado na cidade de Porto Alegre – RS, com o auxílio de três caminhões basculantes. A dosagem utilizada foi o mesmo da Pista experimental da BR-116/RS km 495, correspondente a mistura BSM-EARP-nE, com 1% de cimento e teor de emulsão de residual de 2,0% EARP.

Nas primeiras horas da tarde, foi realizada a execução da camada de BSM. Devido ao material ter sido transportado por uma longa distância, optou-se por despejar o mesmo fora da caixa de execução, e colocá-lo com o auxílio de uma retroescavadeira. A Figura 50 apresenta o descarregamento da BSM, bem como a pá carregadeira realizando a homogeneização do material.

Figura 50: Descarregamento e homogeneização da BSM - Pista F



Ao colocar o material na caixa da pista experimental, o mesmo, foi espalhado e nivelado com o auxílio de uma motoniveladora. Após, executou-se a compactação do material. A Figura 51 apresenta o material sendo espalhado e o nivelamento.

Figura 51: Espalhamento e nivelamento da BSM



A compactação do material ocorreu com o auxílio de um rolo liso e um rolo de pneus, sendo executadas 8 fechas para a completa compactação da BSM. A Figura 52 apresenta a execução da compactação da BSM.

Figura 52: Compactação BSM - Pista F



A Figura 53 apresenta a camada de BSM no dia seguinte à execução. Observa-se que ainda há a presença de umidade. Contudo, visualmente, ela apresenta uma boa aparência.

Figura 53: Pista F um dia após a execução da camada de BSM



Após 10 dias de cura, realizou-se a execução do microrrevestimento. A execução do microrrevestimento demorou para ser executada, devido a dificuldades da empresa executora da obra em realizar o serviço. A Figura 54 apresenta a pista F junto com as demais pistas experimentais executadas no LAPAV, com o revestimento finalizado e sinalizada.

Figura 54: Pista F finalizada e sinalizada



2.5.3.2.2 Ensaios de controle de Campo – Pista F

Foi realizado o controle de densidade da pista com a realização do ensaio de frasco de areia seguindo a norma DNER-ME 092/94 (DNER, 1994). O ensaio foi realizado no dia seguinte à compactação da BSM, em dois pontos. A Figura 55 apresenta a execução do ensaio pela empresa terceirizada que acompanhava a obra.

Figura 55: Ensaio de densidade *in situ* - pista F

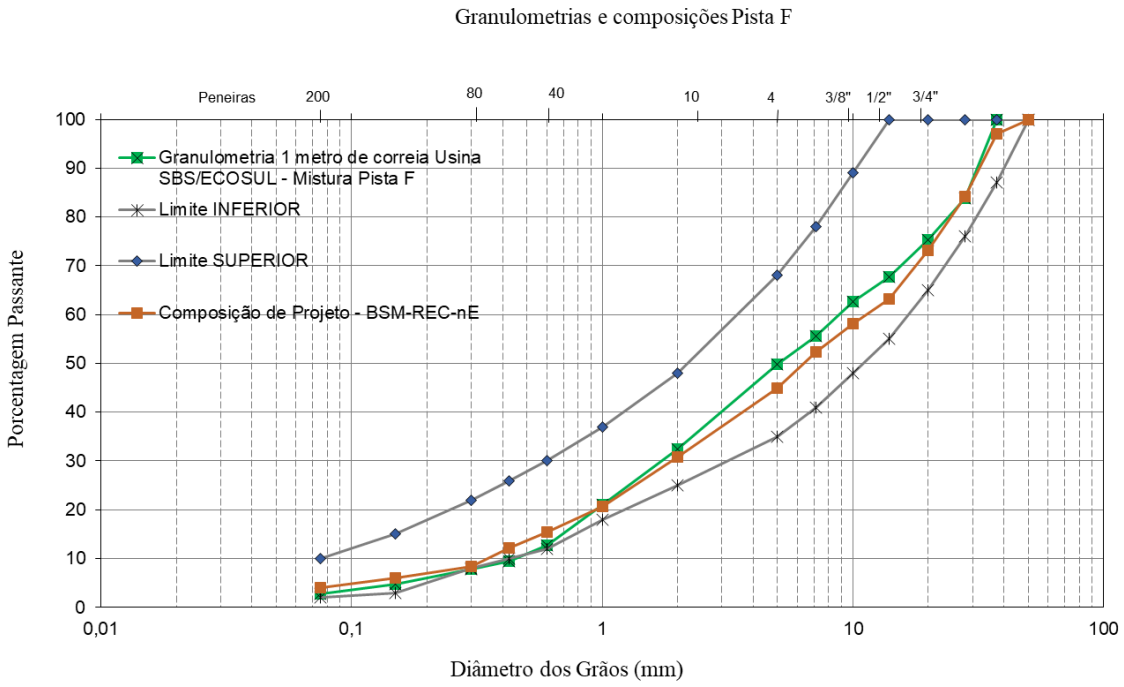


Obtiveram-se os resultados de 98,6% e 104,9% de grau de compactação com relação a densidade de laboratório de 2,069 g/cm³. O ANEXO II disponibiliza os resultados fornecidos pelo controle tecnológico de campo fornecidos pela empresa fiscalizadora da obra de construção das Pistas Experimentais.

2.5.3.2.3 Ensaios de laboratório

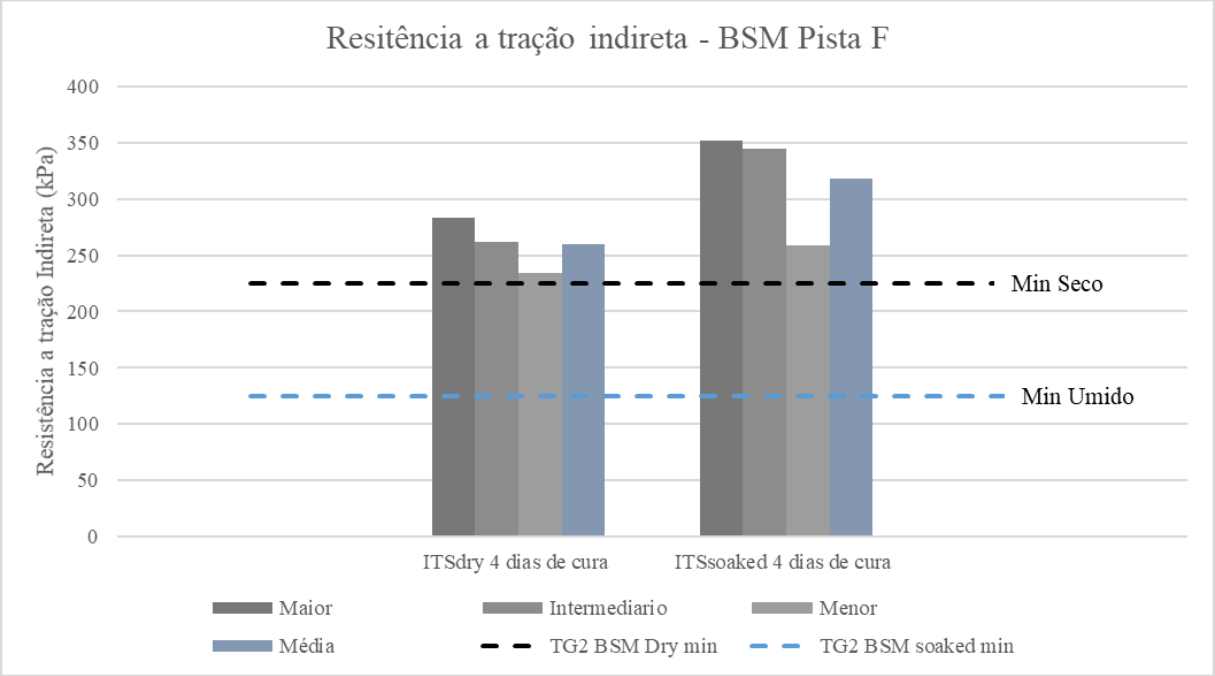
Para verificar a compatibilidade do projeto BSM-EARP-nE, realizou-se a verificação da granulometria da mistura executada, com a amostra retirada de um metro de correia. A Figura 56 apresenta o gráfico correlacionando a granulometria da mistura versus a granulometria de projeto BSM-EARP-nE.

Figura 56: Análise granulométrica BSM-EARP-nE vs executado Pista F



A fim de avaliar a resistência à tração indireta do material usinado, realizou-se a coleta de material transportado ao LAPAV e moldaram-se seis corpos de prova em laboratório, rompidos após cura de 72 horas em estufa a 40°C, sendo três CP's mantidos a mais 24 horas a temperatura de 25°C e três CP's submetidos a cura submersa. A compactação foi realizada em laboratório com o auxílio do compactador vibratório em duas camadas com dimensões de 95 mm de altura x 150 mm de diâmetro. Ressalta-se que devido ao material já estar na umidade correta e com a emulsão adicionada, não foi realizada a remoção dos agregados maiores que 19 mm como foi realizado no processo de dosagem. A Figura 57 apresenta graficamente os valores obtidos de ITS para os CP's moldados com o material da pista F. Constatou-se que os resultados obtidos foram superiores aos valores mínimos preconizados no TG2 (SABITA, 2020), mesmo sem a remoção dos agregados maiores que 19 mm. Também observa-se que os resultados obtidos de ITS correspondentes à cura úmida foram superiores à cura seca.

Figura 57: ITS material Usinado - Pista F



2.5.3.3 Acompanhamento dos Trechos experimentais

Nos dias 6 e 7 do mês de junho de 2023 realizou-se uma campanha de leituras de LWD (Light weight deflectometer), e no dia 09 de junho de 2023, realizou-se uma campanha de FWD (Falling weight deflectometer) de múltiplas cargas nos trechos experimentais a serem acompanhados no presente RDT. Ressalta-se que há uma retificação com relação aos trechos descritos no projeto do RDT em relação aos trechos monitorados. Assim, realizara-se os monitoramentos ao longo do projeto nos seguintes trechos experimentais:

- BR-392/RS km 174+300 ao km 175+000, com execução em 2011;

- BR-116/RS km 417+400 ao km 417+600, com execução em 2015;

- BR-116/RS km 506+00 ao km 507+ 000, com execução em 2019;

- BR-116/RS km 495+360 ao km 495+540, com execução em janeiro de 2023.

2.5.3.3.1 Execução ensaios LWD

Aos seis dias do mês de junho de 2023, realizou-se as primeiras campanhas de LWD nas pistas experimentais a serem acompanhadas pelo RDT. A coleta de dados iniciou-se no km 417+400 ao km 417+600, na BR-116/RS. Destaca-se que este trecho monitorado é pista simples, assim, necessitou-se realizar a sinalização do mesmo, e a retenção do fluxo primeiramente na faixa sentido sul e após a faixa sentido norte, para realizar o levantamento.

A partir da placa do km 417, demarcou-se lateralmente a pista, o ponto de inicial de monitoramento no km 417+400. A partir da marcação inicial, realizou-se a demarcação lateral e leituras de 40 em 40 metros até o km 417+600, tanto para a pista norte, quanto para a pista sul. A Figura 58 apresenta o km inicial e o equipamento LWD.

Figura 58: Monitoramento LWD junho 2023 - km 417+400 ao km 417+600



Após, realizou-se o levantamento no km 495+360 ao km 495+520, na BR-116/RS, correspondente ao trecho experimental construído dentro do RDT em janeiro de 2023. Devido a pista

acompanhada, corresponder a faixa pesada sentido sul, a faixa foi bloqueada ficando o trânsito fluindo somente pela faixa da esquerda.

A partir da placa do km 495, demarcou-se o ponto inicial correspondente ao km 495+360. Por tratar-se do trecho experimental construído dentro do RDT, realizou-se a demarcação e leituras com o LWD a cada 20 metro. A Figura 59 apresenta a demarcação feita para o trecho correspondente.

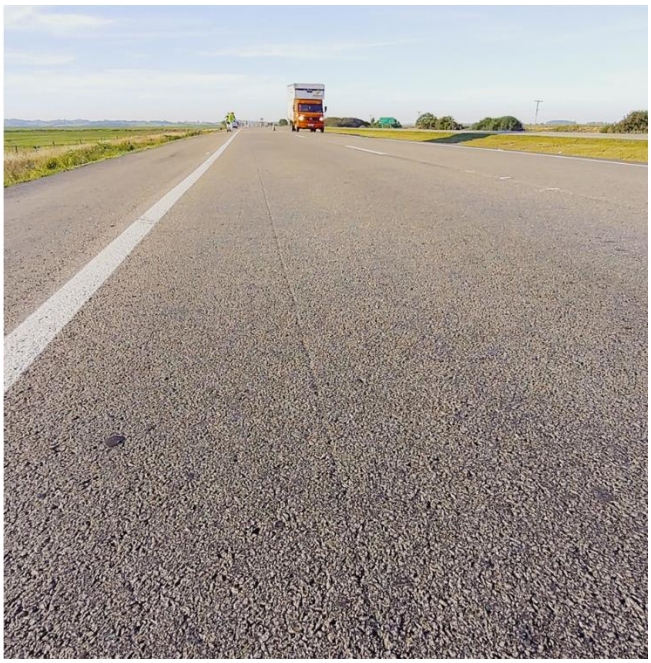
Figura 59: Monitoramento LWD junho 2023 BR-116/RS- km 495+360 ao km 495+520



Ainda no dia seis de junho, realizou-se o levantamento no trecho correspondente ao km 506 ao Km 507 da BR-116/RS. Devido à extensão do trecho ser de 1000m, optou-se por realizar um levantamento correspondente a 200 m entre os km 506+400 ao km 506+600, espaçado de 40 em 40 m na faixa pesada, sentido sul. Por ser um trecho de pista dupla, somente realizou-se a sinalização e bloqueio da faixa pesada, não havendo retenção de trânsito. Assim como nos demais trechos, demarcou-se o ponto inicial de leituras, considerando a placa lateral a pista correspondente ao km 506. A Figura 60 apresenta o trecho e a demarcação.

Figura 60: Monitoramento LWD junho 2023 BR-116/RS - km 506+000 ao 507+000





No dia sete de junho de 2023, realizou-se o monitoramento correspondente ao km 174+300 ao km 175+000 na BR-392/RS. Por corresponder ao trecho de 700 metros, optou-se por realizar o levantamento em 200 m correspondente ao km 174+400 ao km 174+600, com leituras a cada 40 m. Assim como nos demais trechos, realizou-se a marcação lateral na pista a partir da placa do km 174. O levantamento ocorreu na faixa sentido norte, onde, por ser pista simples, houve a necessidade de realizar a retenção do trânsito com siga e pare. A Figura 61 apresenta o trecho monitorado.

Figura 61: Monitoramento LWD junho 2023 BR-392/RS - km 175+400 ao 175+600



2.5.3.3.2 Execução FWD

A execução do FWD Foi realizada pela concessionaria com uma empresa parceira no dia nove de junho de 2023. A execução da presente campanha de FWD ocorreu de forma particular, pois utiliza-se um conjunto de cargas diferenciado, para assim avaliar a não linearidade do material. Assim, solicitou-se a empresa executante do FWD que se realiza ensaios de múltiplas cargas conforme a Tabela 8.

A determinação dos níveis de carga ocorrem a partir do preconizado pela Federal Highway Administration (2000). A campanha foi realizada coletando dados ao longo de todos os trechos experimentais localizados na BR 116/RS e na BR/392. As leituras ocorreram a cada 20 metros.

Tabela 8: Níveis de Carga FWD

Altura	Carga Alvo (kN)	Carga Alvo (kips)	Faixa aceitável (kN)	Faixa aceitável (kips)
1	26,7	6,0	24,0 a 29,4	5,4 a 6,6
2	40,0	9,0	36,0 a 44,0	8,1 a 9,9
3	53,4	12,0	48,1 a 58,7	10,8 a 13,2
4	71,2	16,0	64,1 a 78,3	14,4 a 17,6

Como o ensaio foi executado no mês de junho, a empresa executante do levantamento ainda não havia disponibilizado os dados dos levantamentos para a confecção do Relatório Parcial 1.

2.5.4 Iniciação Científica e Artigos

Dentro do projeto do RDT realizou-se o desenvolvimento de um artigo, intitulado "*Bitumen stabilized materials as pavement overlay: Laboratory and field study*", ANEXO , publicado na revista *Construction and Building Materials*. A revista em questão apresenta uma alta relevância em publicações na área de construção e materiais, com classificação Qualis A1.

2.6 Quadro Resumo – Atividades Previstas X Desenvolvidas

Atividades Previstas	**Produtos Esperados**	**Atividades Executadas**	**Status das Atividades Executadas**	**Produtos Gerados**
Etapa de Laboratório	- Relatório - Artigo - Iniciação cientifica - Tese de doutorado	Etapa de Laboratório	Concluídas conforme o previsto para o período	- Relatório - Artigo - Iniciação cientifica - Tese de Doutorado

Etapa de Campo	-Relatório	Etapa de Campo	Concluídas conforme o previsto para o período	- Relatório
Elaboração de relatórios	- Relatório	Elaboração de relatórios	Concluídas conforme o previsto para o período	- Relatório

2.7 Atividades Previstas para o Próximo Período (01/06/2023 a 30/11/2023)

Na sequência são listas as atividades previstas para serem realizadas no período que compreende o segundo semestre do projeto "Estudo de compósitos de cimento, emulsão com fresado asfáltico e agregados virgens para bases de elevado desempenho".

1. Etapa de Laboratório
2. Etapa de Campo
3. Análise de dados
4. Elaboração de relatórios

3. SEGUNDO SEMESTRE DO PROJETO

3.1 RESUMO

As atividades de execução do presente RDT tiveram início em janeiro de 2023. Este item do Relatório Final refere-se ao segundo semestre, abrangendo o período entre julho e dezembro de 2023, conforme apresentado em janeiro de 2024. As atividades previstas no Plano de Trabalho foram desenvolvidas de acordo com o cronograma físico-financeiro estabelecido.

3.2 ATIVIDADES PREVISTAS PARA O PERÍODO

Para o período que contempla o primeiro semestre do projeto “Estudo de compósitos de cimento, emulsão com fresado asfáltico e agregados virgens para bases de elevado desempenho” estavam previstas para realização as seguintes atividades:

1. Etapa de Laboratório
2. Etapa de Campo
3. Análise de dados
4. Elaboração de relatórios

3.3 ATIVIDADES EXECUTADAS PARA O PERÍODO

Para o período que contempla o primeiro semestre do projeto “Estudo de compósitos de cimento, emulsão com fresado asfáltico e agregados virgens para bases de elevado desempenho” foram executadas as seguintes atividades:

1. Etapa de Laboratório
2. Etapa de Campo

3. Análise de dados

4. Elaboração de relatórios

3.4 JUSTIFICATIVAS

Todas as atividades previstas foram executadas conforme cronograma físico-financeiro.

3.5 DESCRIÇÃO DAS ATIVIDADES DESENVOLVIDAS

O segundo semestre do projeto " Estudo de compósitos de cimento, emulsão com fresado asfáltico e agregados virgens para bases de elevado desempenho ", compreendido entre os meses de julho a dezembro de 2023, transcorreu conforme o previsto no cronograma físico-financeiro. As atividades desenvolvidas incluíram a continuação e conclusão da etapa de laboratório e continuação da etapa de campo. Também, ocorreu o início da análise de dados e elaboração de relatórios. A seguir, são descritas as atividades executadas no segundo semestre.

3.5.1 Etapa de Laboratório

O Relatório Parcial 2 teve início com uma revisão dos conceitos relacionados à resistência à tração indireta e procedimentos do triaxial monotônico, com o objetivo de contextualizar os procedimentos aplicados na dosagem e cura da BSM. Esse enfoque é essencial para fundamentar a escolha dos métodos utilizados, assegurando que os parâmetros técnicos sejam devidamente compreendidos e aplicados no contexto deste estudo. Entretanto, considerando que essa mesma revisão foi previamente apresentada no Item 2.5.1.3.3 - Projeto de Mistura: Procedimentos, optou-se por não reproduzir o conteúdo neste relatório. Essa decisão visa evitar redundâncias e garantir maior objetividade na apresentação das informações, mantendo o foco na análise dos novos resultados e avanços específicos deste estágio do trabalho.

A realização dos ensaios, bem como suas avalições seguiram o preconizado em normas e procedimentos nacionais e internacionais. Devido a não se ter normas especificas para a BSM a nível nacional, e analise de seus paramentos, seguiu-se o TG2 (SABITA, 2020), para procedimentos de moldagem e cura. Já para avaliação de alguns parâmetros utilizou-se ora normas nacionais para avaliação de misturas asfálticas, ora normas nacionais para avaliação de materiais granulares estabilizados ou não.

3.5.1.1 Avaliação do tempo de cura da mistura RAP+AV+CP+EM com emulsão EARP

Como forma de avaliar os períodos de cura da mistura, optou-se por realizar ensaios de resistência a tração indireta para diferentes idades. A avaliação do tempo de cura utilizando o ensaio de ITS também foram realizado por (Mollenhauer *et al.*, 2023), com enfoque em temperaturas. Contudo, a avaliação realizada no presente RDT teve enfoque na variação dos tempos de cura e condições de cura.

Assim, corpos de prova de 95mm de altura por 150 mm de diâmetro foram moldados no compactador vibratório e submetidos aos ensaios de resistência a tração indireta (ITS). Utilizou-se como padrão de dosagem o traço BSM-EARP-nE, emulsão EARP, com substituição dos agregados maiores que 19 mm.

Para isso, conjuntos de seis corpos de prova para cada uma das varrições foram moldados, e ensaiados em diferentes condições. As seguintes variações foram utilizadas:

- Três CP’s - 72 horas em estufa a 40°C + 24 horas em temperatura ambiente;

- Três CP’s - 72 horas em estufa a 40°C + 24 horas em temperatura ambiente + + 24 horas a temperatura ambiente submerso em água;
- Três CP’s - 72 horas em estufa a 40°C + 30 dias a temperatura ambiente;
- Três CP’s - 72 horas em estufa a 40°C +30 dias a temperatura ambiente + 24 horas a temperatura ambiente submerso em água;
- Três CP’s - 72 horas em estufa a 40°C + 60 dias a temperatura ambiente;
- Três CP’s - 72 horas em estufa a 40°C +60 dias a temperatura ambiente + 24 horas a temperatura ambiente submerso em água;

- Três CP’s - 72 horas em estufa a 40°C + 90 dias a temperatura ambiente;
- Três CP’s - 72 horas em estufa a 40°C +90 dias a temperatura ambiente + 24 horas a temperatura ambiente submerso em água;
- Três CP’s - temperatura ambiente até constância de massa+24 horas a temperatura ambiente;
- Três CP’s - temperatura ambiente até constância de massa + 24 horas a temperatura ambiente submerso em água;
- Três CP’s com 1% de cimento – Cura 72 horas em estufa a 40°C + 24 horas ao ar a 25°C e condicionamento DUI, conforme a norma DNIT 180-ME (2018)

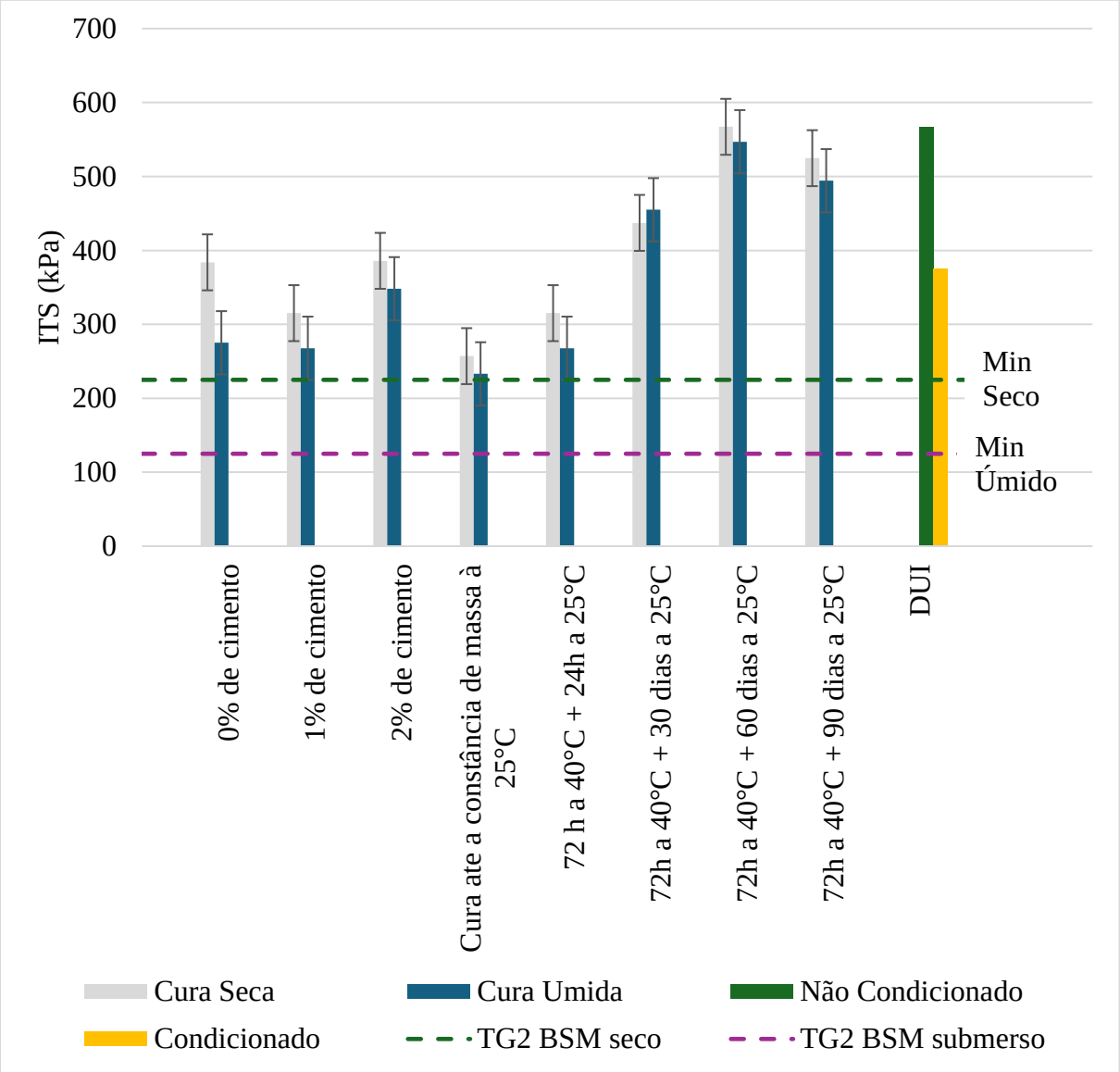
Os corpos de prova que ficaram em temperatura ambiente para as idades de 30, 60 e 90 dias, permaneceram ao ar, em sala com ambiente controlado, conforme a Figura 62.

Figura 62: Corpos de prova Rompimento 60 dias



A Figura 63 apresenta os resultados obtidos no ensaio de resistência a tração indireta, na avaliação da variação do tempo de cura para a mistura BSM-EARP-nE. Pode-se observar que a variação dos tempos de cura leva a um ganho de resistência ITS. Esse ganho de resistência já é observado na literatura, onde com o passar do tempo percebe-se um aumento característico da resistência do material.

Figura 63: Avaliação tempo e tipos de cura - BSM-EARP-nE

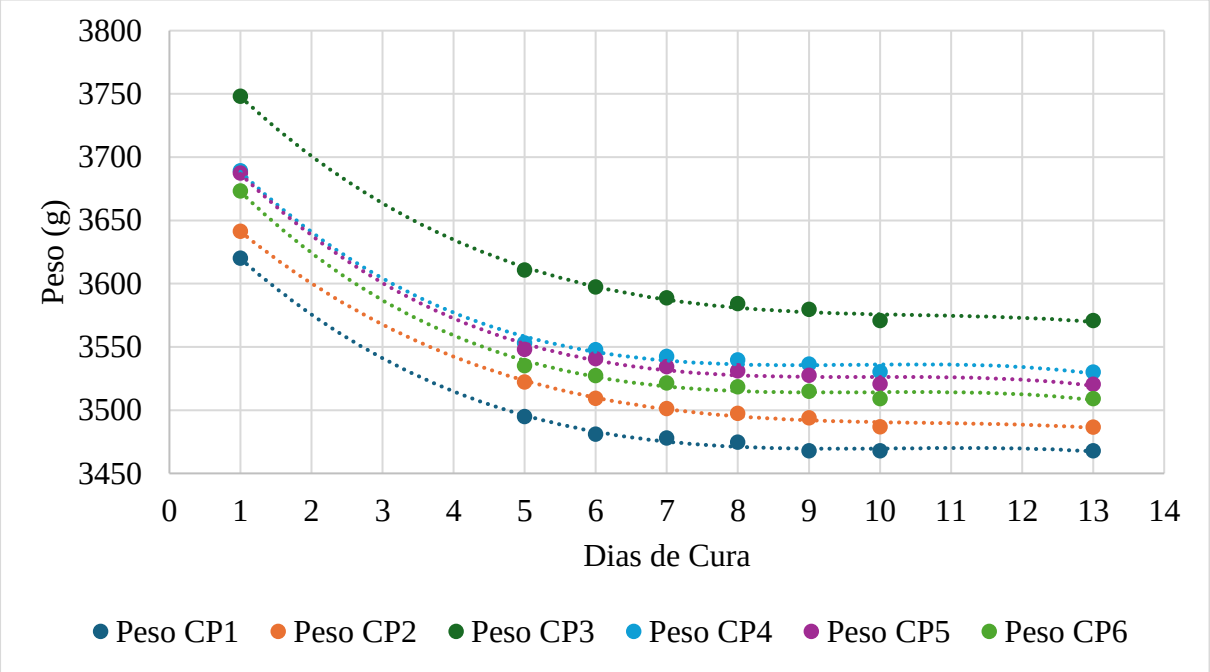


Observa-se na Figura 63, que para todas as situações propostas, os valores mínimos de ITS são atingidos, tanto para cura seca e úmida. Quando se compara à cura padrão, 1% de cimento + 72 horas em estufa a 40°C + 24 h em cura seca ou úmida, com 1% de cimento + 72 horas em estufa a 40°C +30 dias de cura seca + 24 h em cura seca ou úmida, há um ganho de resistência à tração indireta. Também, observa-se que a cura úmida apresenta uma resistência levemente superior à cura úmida na cura correspondente a 30 dias. Correspondente a 60 dias, tem-se os maiores valores de ITS chegando na casa dos 550 kPa para cura seca e úmida. Observa-se que comparando a cura

padrão com a cura após 90 dias, obteve-se um acréscimo de 40% na resistência a tração indireta. Outro ponto avaliado refere-se a corpos de prova, com mesma configuração dos demais, contudo submetido ao condicionamento de dano por umidade induzida (DUI), onde mesmo após o condicionamento dos corpos de prova a uma condição mais estrema, em amarelo, o mesmo ainda se encontra com resistências superiores as mínimas exigidas tanto para a condição seca quanto úmida.

Com o intuito de verificar a perda de umidade do material, a Figura 64 apresenta a variação ao longo dos 13 dias, onde os corpos de prova submetidas a cura ao ar foram pesados, e registrados o seu peso. Consegue-se observar que a variação possui uma tendência bem definida, onde nos primeiros dias há uma elevada perda de massa correspondente a perda de água. Esse estudo, deveu-se, pois, necessita-se entender o comportamento do material quanto a perda de água, para assim, conseguir de maneira mais assertiva realizar a liberação do tráfego quando utilizado o material em pista.

Figura 64: Avalição da perda de água para cura ao ar



3.5.1.2 Avaliação do teor de filler

Para responder uma das questões de pesquisa, “Qual seria o teor de cimento necessário para iniciar a contribuição mecânica por aglutinação?”, realizou-se avalição da variação do teor de filler incorporado ao material. Corpos de prova de 150mm de diâmetro por 95mm de altura foram moldados no compactador vibratório com a mistura BSM-EARP-nE, onde avaliou-se a incorporação, ou não, dos teores de 0%, 1% e 2% de cimento. Assim, foram moldadas e ensaiadas as seguintes combinações:

- Três CP’s com 0% de cimento – cura 72 horas em estufa a 40°C + 24 horas a temperatura ambiente;
- Três CP’s com 0% de cimento – cura 72 horas em estufa a 40°C + 24 horas a temperatura ambiente submerso em água;
- Três CP’s com 1% de cimento – cura 72 horas em estufa a 40°C + 24 horas a temperatura ambiente;
- Três CP’s com 1% de cimento – cura 72 horas em estufa a 40°C + 24 horas a temperatura ambiente submerso em água;
- Três CP’s com 2% de cimento – cura 72 horas em estufa a 40°C + 24 horas a temperatura ambiente;
- Três CP’s com 2% de cimento – cura 72 horas em estufa a 40°C + 24 horas a temperatura ambiente submerso em água;

Para a avaliação do teor de filler considerou-se a cura padrão do TG2, onde, uma vez extraídos os corpos de prova de seus respectivos moldes e marcados, são colocados em estufa a temperatura de 40 °C (±1 °C) e período mínimo de 72 horas (3 dias). A cura de espécimes ITS produz a condição “Seca” para teste. Após 72 horas, os corpos de prova foram retirados da estufa pesados cada um, registrando a massa individual. Retorne todas as amostras ao forno a 40 °C por mais 4 horas e repita o exercício de pesagem. Se a massa de qualquer amostra diminuir em mais de 10 g, coloque todas as amostras novamente no forno por mais 24 horas. Este procedimento é repetido quantas vezes forem necessárias até que os corpos de prova atinjam massa constante. As amostras são então deixadas para resfriar a uma temperatura constante de 25 °C (±2 °C).

Três amostras então foram submetidas ao rompimento em condição seca e três amostras foram submetidas ao rompimento na condição úmida, após 24 horas submersas. A Figura 65 apresenta os

resultados das médias dos 3 CP's para cada uma das condições impostas. Ao avaliar a variação do teor de cimento, conforme descrito anteriormente, observa-se que os valores obtidos estão acima do mínimo desejado em ambas as condições de cura. Destaca-se, contudo, que mesmo na ausência de cimento (0%), o valor de ITS supera 1%. Esse comportamento é atribuído ao calor de hidratação do material com 1% de cimento, cuja perda mais acentuada de água impacta negativamente no processo de cura. Com 2% de cimento, observa-se um leve incremento na resistência.

Pode-se observar que a variação do teor de cimento não foi substancialmente para a elevação ou decréscimo da ITS. Observa-se ainda que 0% de cimento apresentou na média uma resistência melhor do que teor de 1% de cimento. Na Figura 66a apresenta-se uma mistura com teor de 0% de cimento e a Figura 66b 1% de cimento. Para um mesmo traço, a taxa de 1% de cimento auxiliou na trabalhabilidade e estabilidade da mistura, deixando a mesma mais coesa e com menos umidade aparente.

Figura 65: Avaliação do teor de cimento - BSM-EARP-nE

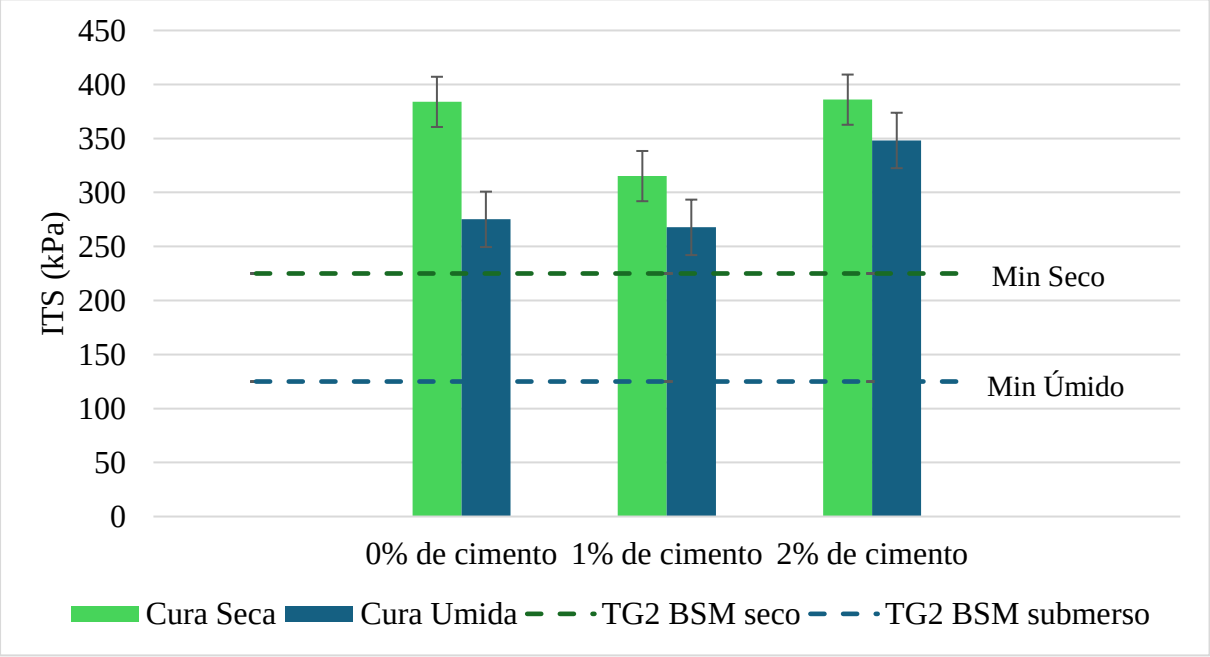


Figura 66: a) Mistura com teor 0% e b) Mistura com teor 1%

a)  b) 

3.5.1.3 Ensaio de Módulo Dinâmico da mistura RAP+AV+CP+EM

Para realização do ensaio de modulo dinâmico segue-se os procedimentos da norma DNIT 416/2019-ME Pavimentação asfáltica – Misturas asfálticas – Determinação do módulo dinâmico – Método de ensaio (DNIT, 2019).A adoção desta normativa justificou-se por ser o mais próximo de utilização, pois mesmo o material não sendo uma mistura asfáltica, necessitava-se de um procedimento para a sua execução.

Ensaio de Módulo Dinâmico da mistura RAP+AV+CP+EM

Foram moldados 6 corpos de prova de 15cm de altura por 10 cm de diâmetro no compactador giratório utilizando a mistura BSM-EARP-nE. A densidade aparente seca permaneceu na casa dos 2,069 g/cm³ com um volume de vazios médio de 12,5% e grau de compactação médio de 100%. Observa-se que o volume de vazios dos corpos de prova é superior ao exigido pela norma. No entanto, buscou-se ensaio o material em sua condição de projeto, onde a densidade ficou em 100%.

Devido aos corpos de prova serem executados com emulsão asfáltica, e não se ter uma norma especifica de modulo dinâmico para as moldagens dos mesmo, realizou-se o procedimento de cura preconizado no TG2 (SABITA, 2020) recomendado para o ensaio de triaxial monotônico descrito no item 2.1.2.

O ensaio foi realizado com as temperaturas de 4°C, 20°C e 40°C. Com o número de ciclos e frequências descritos na Tabela 9.

Tabela 9: Número de ciclos para cada frequência de teste

Frequência (Hz)	Número de Ciclos
25	200
10	200
5	100
1	20
0,5	15
0,1	15

Fonte: DNIT 416-ME (2019)

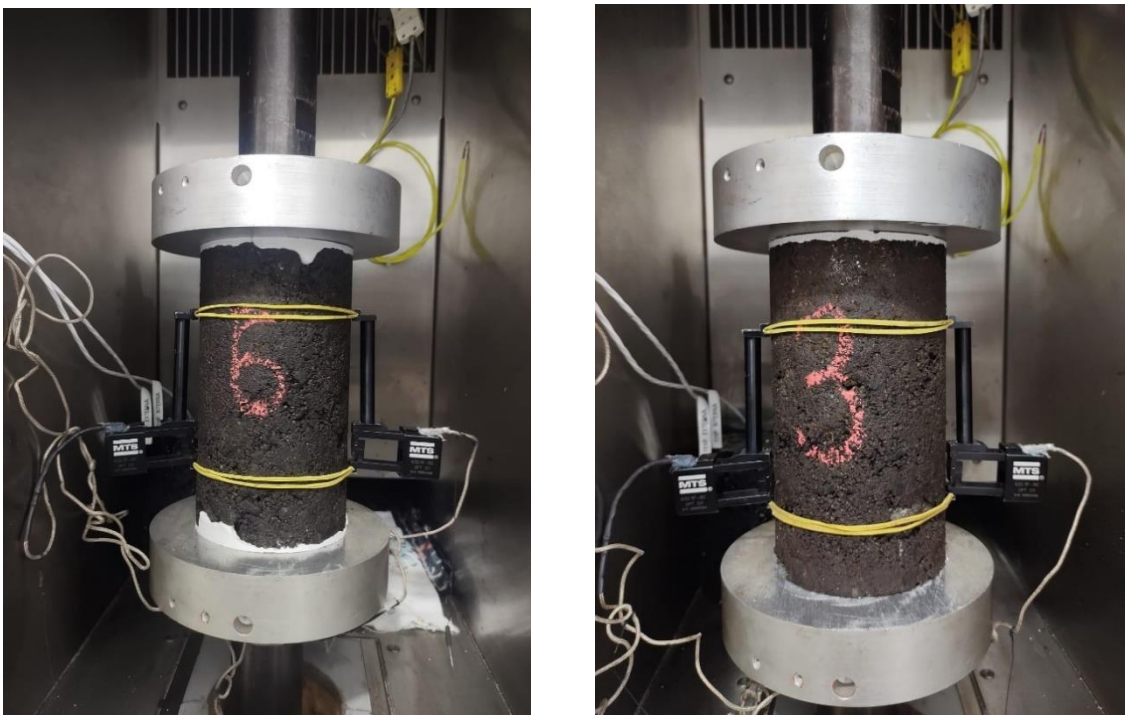
Devido a pequenas irregularidades nas faces de aplicação de cargas, necessitou-se realizar o capeamento dos corpos de prova com gesso. A Figura 67 apresenta os corpos de prova pós capeamento.

Figura 67: Corpos de prova modulo dinâmico capeados



A Figura 68 apresenta o ensaio de modulo dinâmico sendo executado. Destaca-se que o ensaio utiliza extensômetros para as leituras. Os resultados e análises das curvas obtidas serão apresentados no item Análise de Dados.

Figura 68: Ensaio de Modulo Dinâmico

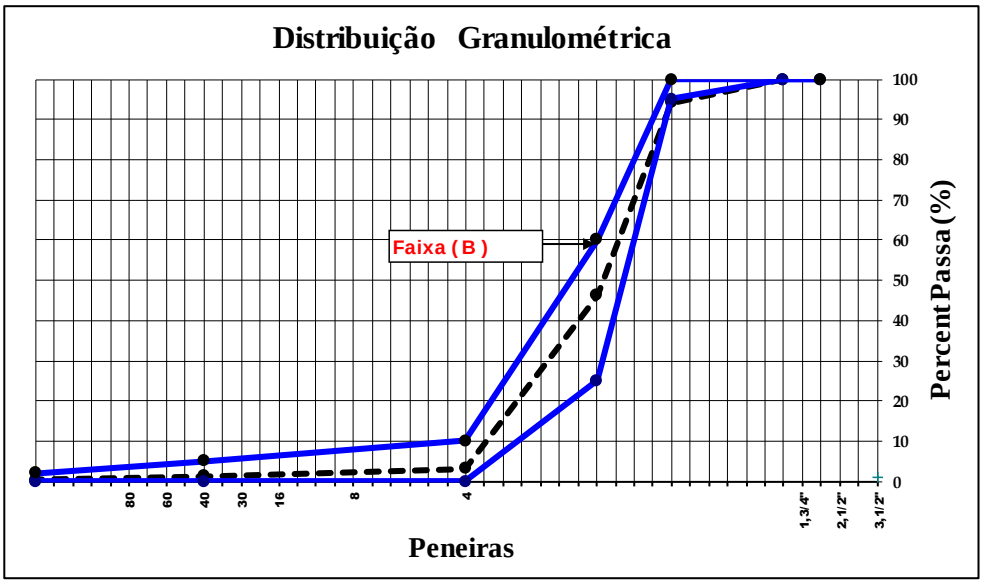


Ensaio de Módulo Dinâmico da mistura base negra

Como forma de comparação dos materiais, buscou-se avaliar o comportamento da base negra utilizada no RDT "Avaliação do comportamento mecânico de misturas asfálticas com ligante modificado por borracha usinadas a temperaturas intermediárias e de bases negras usinadas com emulsão asfáltica", ao qual corresponde a uma granulometria aberta, sem a utilização de fresado e cimento, e com emulsão RM-2C. A Figura 69 apresenta a curva granulometria base negra e as especificações obtidas em projeto. A mesma, é composta por 30% de brita 1", 50% de brita ¾ e 20% de brita 3/8, seguindo o preconizado a especificação de norma DNER - ES - P 106/80. Possui um equivalente de areia de 62,4.

Figura 69: Propriedades Base Negra sem RAP

PROPRIEDADES FINAIS DA MISTURA		
Propriedade	*DNER ES - ES - P 106/80*	*Valor de Projeto*
Teor de Betume (%)	*ACOSTAMENTO*	**4,50**
Volume de Vazios (%)	5 A 30	**25,50**
Relação Betume Vazios (%)	X	**X**
Vazios do Agregado Mineral (%)	X	**X**
Densidade Máxima Teórica (kN/m³)	--	**2,429**
Densidade Aparente (kN/m³)		**1,810**
Estabilidade (kgf)	>350	**376**
Fluência (1/100 in)		**10,9**
Resistência à Tração (MPa)	--	**0,00**
Módulo de Resiliência (MPa)	--	**0,00**
Relação Mr/Rt (adm)	--	
Relação Est/Fluência (kgf.m)	--	
Relação Filler/Betume (%)	0,6 a 1,4 (Superpave)	



Para realizar o ensaio de modulo dinâmico, realizou-se a moldagem de CP's de 15cm de altura por 10cm de diâmetro no compactador giratório. Contudo, ao realizar a extração dos corpos de prova do molde após a compactação os mesmos desagregavam-se. A Figura 70 apresenta um corpo de prova após a desmoldagem.

Figura 70: CP Base negra desmoldagem após compactação



Diferentes estratégias foram adotadas na tentativa de desmoldar os corpos de prova sem que houvesse sua desagregação; entretanto, nenhuma das soluções testadas foi bem-sucedida, evidenciando a necessidade de contenção para evitar a perda de integridade dos corpos de prova. Devido à realização do ensaio sem o uso de membrana, não foi possível determinar as propriedades do material no ensaio de módulo dinâmico. A Figura 71 apresenta os corpos de prova para diferentes soluções de desmoldagem. A Figura 71a apresenta o corpo de prova após permanecer 24 horas dentro do molde e a Figura 71b o corpo de prova após permanecer 24 horas dentro do molde e após ser envolto por plástico filme. Contudo, ao remover o plástico filme, o corpo de prova se desagregava.

Figura 71: a) CP base negra após 24 horas dentro do molde. b) Base negra após 24horas dentro do molde e envolto em plástico filme

a) 

b) 

3.5.1.4 Ensaio de Lottman para avaliação do efeito deletério da água

Como não há uma norma especifica para ensaios de material estabilizado com emulsão, seguiu-se a norma DNIT 180/2018-ME Pavimentação - Misturas asfálticas - Determinação do dano por umidade induzida – Método de ensaio. Por meio dessa norma, seguiu-se os procedimentos de condicionamento e por fim avaliação da resistência a tração indireta do material após os procedimentos. Um conjunto de seis corpos de prova de 150mm de diâmetro por 95mm de altura foi moldado no compactador vibratório.

Para realizar os procedimentos de cura, primeiramente o conjunto de corpos de prova passou pela cura padrão preconizado pelo TG2 determinação da resistência a tração indireta devido a necessidade de ocorrer o completo rompimento da emulsão asfáltica e o material estar em sua condição mínima de resistência. O Procedimento de cura é descrito no item 2.5.1.3.3.

Após três corpos de prova foram reservados e mantidos em sala com temperatura controlada a 25°C. Estes corpos de prova serão denominados sem condicionamento. Os outros três corpos de

provas foram submetidos ao condicionamento conforme descrito na norma DNIT 180/2018-ME. Onde o conjunto condicionado foi submetido:

a) Submergiu-se cada corpo de prova do conjunto dentro do recipiente com água destilada.
b) Aplicou-se vácuo na faixa de 13 kPa (97 mm Hg) a 67 kPa (502,5 mm Hg) de pressão absoluta (aumentando gradativamente) por 5 a 10 minutos;
c) Interrompeu-se a aplicação de vácuo, deixando o corpo de prova dentro do recipiente com água por mais 5 a 10 minutos;
d) Retirou-se o corpo de prova da água e eliminar o excesso de água superficial, utilizando um pano umedecido. Em seguida, determinar sua massa.
e) Após a saturação, o corpo de prova foi embalado em filme plástico e colocado dentro de um saco plástico impermeável com 10 ml de água. Levou-se o corpo de prova ao sistema de resfriamento numa temperatura de -18,0 ± 3,0 ºC, por um tempo de no mínimo 16 h.
f) Decorrido o período de resfriamento, deve-se levar o conjunto para um banho de água a 60 ºC ± 1 ºC. O saco plástico e o filme plástico devem ser removidos, para liberação do corpo de prova ainda dentro do banho, assim que for possível sua retirada sem danificar o corpo de prova, o que leva em média alguns minutos após a submersão do conjunto no banho a 60 ºC. Manteve-se, então, o corpo de prova no banho por 24 h ± 1 h.
g) Removeu-se o corpo de prova do banho a 60 ºC e o levar imediatamente à submersão em um banho de água a 25 ºC ± 1 ºC, entre 2 h a 3 h.
h) Após o condicionamento determinou-se a resistência à tração por compressão diametral.

A Tabela 10 apresenta as propriedades e identificação dos corpos de provas submetidos ao ensaio de Lottman. Já a Tabela 11 apresenta os resultados obtidos. A Figura 72 apresenta os resultados em comparação a condição em cura seca e úmida sem condicionamento de dano por úmida induzida e os limites do TG2.

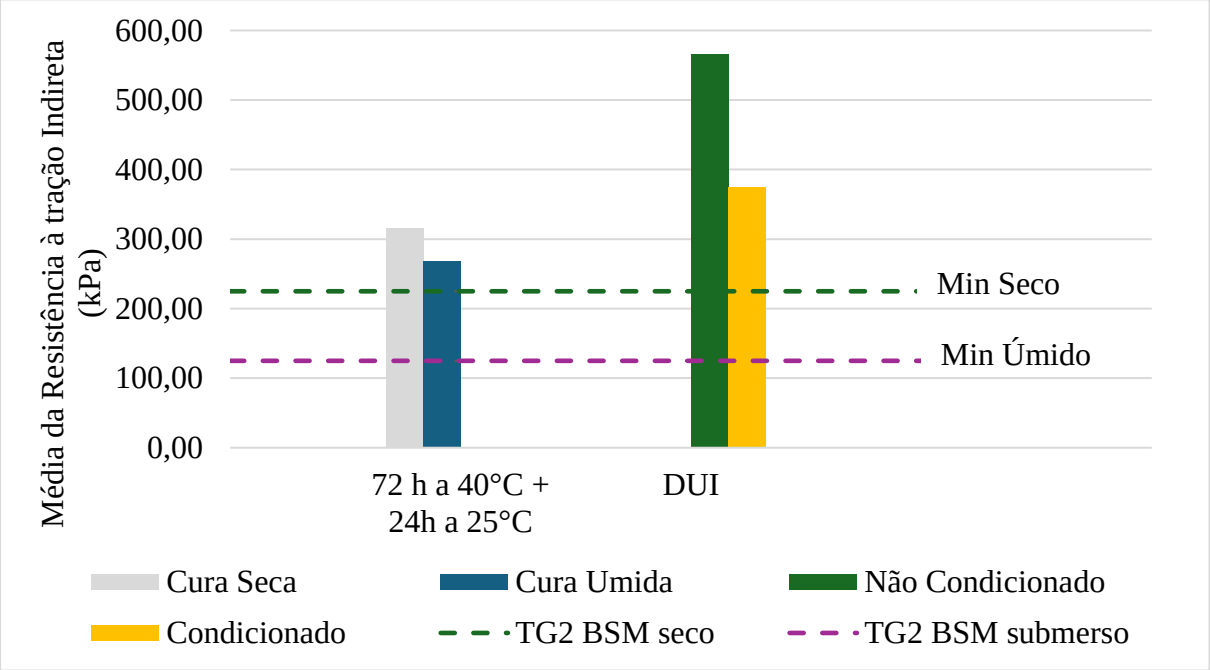
Tabela 10: Propriedades e identificação CP's Lottman

Identificação			***Geometria***		***Densidades***			***Vazios***
% CAP	GOLPES	Nº CP	h (cm)	d(cm)	volume	D aparente	Dmáx medida	vv (%)
Emulsão	Comp. Vibratório	52	9,76	15,04	1676,50	2,12	2,45	13,361
		53	9,63	15,20	1618,40	2,15	2,45	12,406
		54	9,97	15,07	1687,80	2,10	2,45	14,262
		55	9,52	15,08	1614,80	2,16	2,45	12,004
		56	9,64	15,10	1640,20	2,13	2,45	13,196
		57	9,91	15,13	1703,30	2,10	2,45	14,295

Tabela 11: Resultados Ensaio de Lottman

Identificação	***RRT***			***Resistência à Tração***	
Nº CP	Grupo	Leitura (mm)	Rt (MPa)	S/COND	COND
52,00	s	0,580	0,590	0,59	
53,00	c	0,330	0,337		0,34
54,00	s	0,560	0,557	0,56	
55,00	s	0,530	0,552	0,55	
56,00	c	0,370	0,380		0,38
57,00	c	0,410	0,409		0,41
C	Condicionados			0,57	0,38
S	sem condicionamento			RRT =	0,66

Figura 72: Resultados gráficos Lottman



Pode-se observar na Tabela 11 que a razão entre a média da resistência a tração por compressão diametral dos três corpos de prova que sofreram condicionamento pela média da resistia a tração por compressão diametral de três corpos de prova que não sofreram condicionamento ficou em 66%. Essa relação fica abaixo da relação de 75% considerada como a relação para cura seca e submersa do TG2 (SABITA, 2020). Entretanto, ao analisar-se os valores médios, tanto para os CP's

com condicionamento 375kPa e sem condicionamento 566 kPa, os mesmos estão consideravelmente acima do mínimo estabelecido para a condição seca sem condicionamento do TG2 ao qual corresponde a 225 kPa.

3.5.1.5 Ensaios de resistência monotônica por compressão uniaxial e tração direta na mistura (RAP+AV+CP+EM).

Ensaios de resistência monotônica por compressão uniaxial

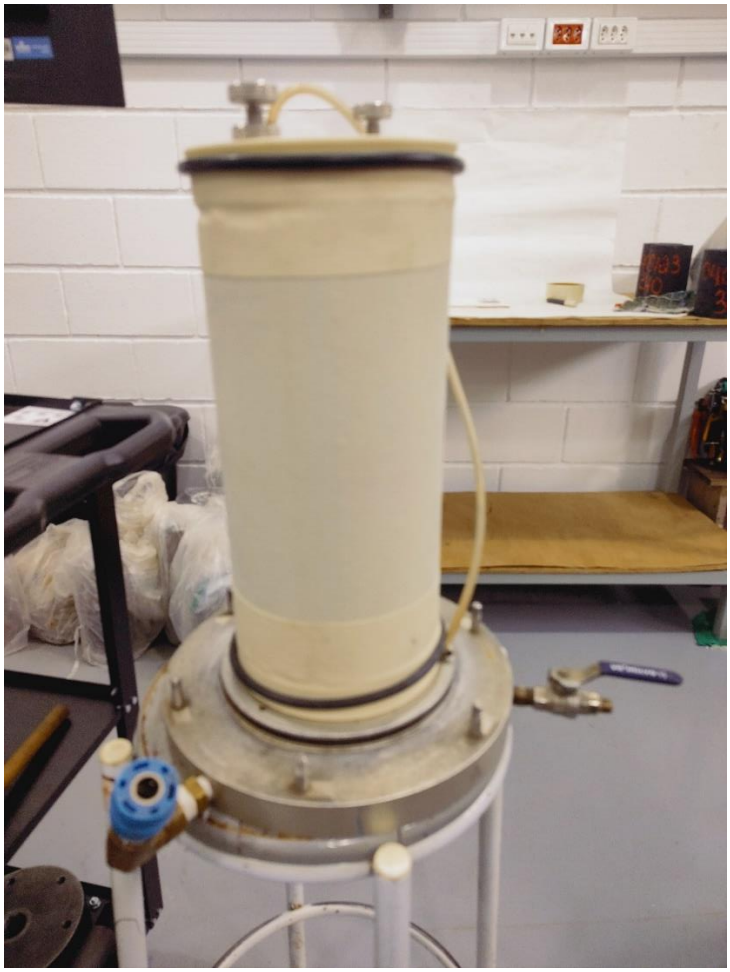
A BSM por ser considerado um material granular e por ser utilizado como uma camada de base possui um comportamento influenciado pelas tensões de confinamento. O ensaio triaxial monotônico é executado aplicando-se diferentes tensões de confinamento σ3 (0kPa, 50 kPa, 100 kPa e 200 kPa) ao material, para assim determinar, a partir dos círculos de Mohr-coulumb as propriedades de cisalhamento de coesão (C) e o ângulo interno de Atrito (φ).
Para se obter esses parâmetros seguiu-se os procedimentos do TG2 (SABITA, 2020), onde 10 corpos de prova de 150mm de diâmetro por 300mm de altura são moldados no compactador vibratório em cinco camadas com o molde tripartido. A Figura 73 apresenta a de moldagem de um corpo de prova.

Figura 73: CP 150x300 triaxial monotônico



Após a desmoldagem, o corpo de prova seguiu o procedimento de cura descrito no item 2.5.1.3.3, e ensaiado logo após. Ressalta-se de oito amostras são ensaiadas na condição seca e duas na condição úmida após ficar 24 horas submersa. O ensaio triaxial monotônico é realizado em quatro pressões confinantes diferentes (σ3): 0 kPa, 50 kPa, 100 kPa e 200 kPa. As duas amostras encharcadas são testadas a uma pressão confinante de 100 kPa. Cada um dos corpos de prova é colocado dentro de uma membrana e posicionado na câmara triaxial. A Figura 74 apresenta a montagem de um CP a ser ensaiado.

Figura 74: Montagem CP para o ensaio de triaxial monotônico



Após a câmara triaxial é posicionada no equipamento de teste de compressão onde um deslocamento a uma taxa de 3mm/min é aplicada, com leituras de carga e deslocamento a cada segundo. A Figura 75 apresenta o ensaio sendo realizado.

Figura 75: Execução do ensaio de triaxial monotônico



O ensaio é pausado quando o deslocamento vertical atinge 18mm (6% de deformação), ou antes se a caga começar a diminuir do máximo. Após a retirada dos corpos de prova da máquina de ensaio, os mesmos foram removidos da câmara triaxial e registrado fotograficamente os locais de ruptura. A Figura 76 apresenta um comparativo antes de depois do corpo de prova triaxial ainda envolto pela membrana de ensaio.

Figura 76: Antes, durante e depois triaxial monotônico



Antes Durante Depois

Para avaliar a umidade, dos mesmos, antes do ensaio eles foram pesados, e após o ensaio, foram mantidos em estufa até a constância de massa. A Figura 77 apresenta alguns corpos de prova após o ensaio. Pode-se observar as deformações criadas, bem como o rompimento do material.

Figura 77: CP's após ensaio triaxial monotônico



Os resultados obtidos no ensaio serão apresentados nos itens posteriores sobre a avaliação do Triaxial Monotônico na análise de Mohr.

Ensaio de tração direta na mistura (RAP+AV+CP+EM)

Para o ensaio de fadiga na tração direta foram moldados 6 CP's de 18cm de altura por 10cm de diâmetro. O ensaio é realizado segundo a norma AASTHO TP 107 Determining the Damage Characteristic Curve and Failure Criterion Using the Asphalt Mixture Performance Tester (AMPT) Cyclic Fatigue Test (AASHTO, 2018).

Como para a realização do ensaio são necessários corpos de prova de 13cm de altura, os mesmos foram serrados, para assim mantem a uniformidade e retirar imperfeições oriundas do processo de moldagem. A Figura 78 apresenta o processo de serragem dos corpos de prova, e como ficou a superfície dos mesmo após a serragem.

Figura 78: Serragem e superfícies CP's FTD





Após a serragem, os corpos de prova foram secos em estufa e colados na superfície. A Figura 79 apresenta os corpos de provas colados.

Figura 79: Colagem CP's FTD



O ensaio consiste em aplicar nos corpos de prova uma deformação cíclica senoidal, de amplitude constante, até que a amostra entre em colapso, ou seja, depois da evolução suficiente de dano à fadiga. Os testes foram conduzidos a uma frequência de 10 Hz e com uma variação da amplitude de deformação em quatro níveis, sendo um nível por amostra, buscando que os níveis de deformação fiquem dentro da faixa de ruptura de 1000 ciclos a 100000 ciclos (Boeira *et al.*, 2018).

3.5.2 Etapa de Campo

A etapa de campo foi realizada em duas frentes de trabalho. Uma correspondente aos quatro trechos experimentais junto a BR 116/RS e BR 392/RS e outra correspondente a Pista F construída junto a área de testes de pavimentos acelerados do LAPAV.

As pistas mais relevantes para o presente Recursos para Desenvolvimento Tecnológico (RDT) são a pista localizada na BR-116/RS, no km 495, e a Pista Experimental F, construída no Laboratório de Pavimentação (LAPAV) da UFRGS, ambas executadas em janeiro de 2023. As duas pistas foram construídas com base na dosagem BSM-EARP-nE, composta por 32,0% de material fresado (granulometria não extraída) misturado com agregado virgem, 28,0% de brita 1 ½", 39,0% de pó de pedra, 1,0% de cimento Portland CP-IV e 2,0% de teor residual da emulsão EARP. O teor de umidade de projeto foi de 7,9%, enquanto a densidade máxima obtida em laboratório, nos ensaios de compactação realizados com energia modificada, correspondeu a 2,069 g/cm³. A execução da pista experimental na BR-116/RS, no km 495, envolveu a fresagem de 18 cm do material existente e a recomposição com 13 cm de BSM e 5 cm de revestimento. Por sua vez, a Pista Experimental F foi construída como uma estrutura nova, utilizando material transportado da usina localizada na cidade de Capão do Leão/RS até Porto Alegre/RS.

3.5.2.1 Acompanhamento da evolução das condições de deformabilidade através do uso de ensaios deflectométricos com FWD em campanhas trimestrais

No mês de outubro de 2023 realizou-se uma campanha de FWD (*Falling weight deflectometer*) de múltiplas cargas nos trechos experimentais a serem acompanhados no presente RDT. Ressalta-se que há uma retificação com relação aos trechos descritos no projeto do RDT em relação aos trechos

monitorados. Assim, realizara-se os monitoramentos ao longo do projeto nos seguintes trechos experimentais:

- BR-392/RS km 174+300 ao km 175+000, com execução em 2011;

- BR-116/RS km 417+400 ao km 417+600, com execução em 2015;

- BR-116/RS km 506+00 ao km 507+ 000, com execução em 2019;

- BR-116/RS km 495+360 ao km 495+540, com execução em janeiro de 2023.

A execução do FWD foi realizada pela ECOSUL no mês de outubro. A execução desta campanha de FWD ocorreu de maneira especial para o acompanhamento das pistas. A execução foi realizada ao longo de todo o trecho experimental, com múltiplas cargas e leituras a cada 20 metros.

O FWD fosse realizado com múltiplas cargas, considerou-se o preconizado pela Federal Highway Administration (2000), conforme a Tabela 8.

3.5.2.2 Realização de poços de sondagem no início do projeto

Realizou-se ao longo do segundo semestre do RDT, sondagens nos trechos experimentais para verificação da estrutura, condição dos materiais e sua análise visual.

3.5.2.2.1 Poço de sondagem BR 116/RS km 495

A realização do poço de sondagem na BR 116/RS km 495 ocorreu de maneira especial pois corresponde ao trecho construído durante o presente RDT. A execução do poço de inspeção ocorreu em outubro de 2023, ou seja, 10 meses após a construção do trecho experimental. Devido ao trecho experimental não ter uma elevada extensão, optou-se pela realização de uma sondagem utilizando uma envaletadeira para assim conseguir ser o menos intrusivo possível. A Figura 80 apresenta a local escolhido para abertura da valeta.

Figura 80: Local da inspeção – BR 116/RS km 495+420



O local escolhido para a realização do poço de sondagem corresponde a um trecho que apresentou fissuras, ao qual será comentado em itens posteriores. Assim, para verificar a possível causa das mesmas, realizou-se a sondagem nesse ponto, onde verificou-se que as fissuras eram originadas no revestimento e não na base de BSM (Objeto de estudo do trecho experimental). A Figura 81 apresenta a abertura da veleta.

Figura 81: Realização da sondagem BR 116/RS km 495+420



A Figura 82 apresenta as camadas após a abertura. A partir da inspeção pode-se constatar que não houve afundamento de trilha de roda na BSM. E as pequenas fissuras que ocorreram foram originadas no pavimento e refletidas para a BSM, fato que será estudado, pois sugere-se a ocorrência de "*top-down"* para a justificativa da patologia encontrada.

Figura 82: Camadas de revestimento e BSM BR 116/RS km 495+420



A Figura 83 apresenta a extração de corpos de prova com sonda rotativa, onde evidencia-se que as fissuras estão presentes na camada de revestimento. Tentou-se realizar a extração de corpos de prova da BSM, contudo com a força da sonda rotativa e a injeção de água a mesma desagrega-se.

Figura 83: Extração Corpos de prova com sonda rotativa BR 116/RS km 495



Finalizados os trabalhos, a valeta foi imprimada, recomposta com mistura asfáltica e compactada. Figura 84 apresenta o fechamento da valeta.

Figura 84: Fechamento da valeta BR 116/RS km 495



3.5.2.2.2 Poço de sondagem BR 116/RS km 417

O poço de sondagem executado no km 417 da BR 116/RS ocorreu em julho de 2023. A Figura 85 apresenta o local onde foi realizado o poço de sondagem.

Figura 85: Poço de sondagem BR 116/RS km 417



Mesmo sendo um trecho construído em 2016, não apresenta afundamentos visíveis nas trilhas de roda, tanto na camada de revestimento quanto na camada de base. A Figura 86 ilustra as camadas observadas no poço de inspeção do referido trecho.

Figura 86: Poço de inspeção BR 116/RS km 417



3.5.2.2.3 Poço de inspeção BR 116/RS km 506

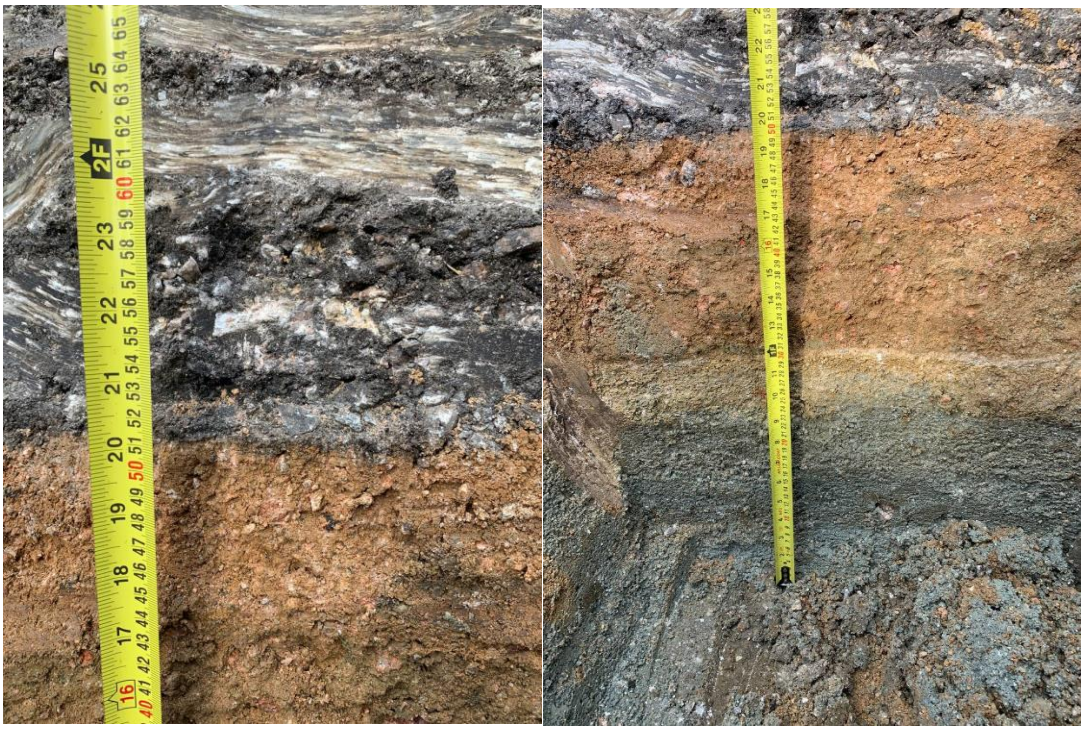
O poço de sondagem da BR 116/RS km 506 foi executado em julho de 2023, na estaca 506+520. A abertura do poço de inspeção ocorreu com o auxílio de uma “bobfresa”. A Figura 87 apresenta a abertura do poço de inspeção.

Figura 87: Abertura do Poço de inspeção BR 116/RS km 506



Após a abertura da vala observou-se não haver nenhum tipo de afundamento de trilha de roda tanto nas camadas de revestimento quanto de base. A Figura 88 apresenta a estrutura das camadas.

Figura 88: Camadas do pavimento BR 116/RS km 506



3.5.2.2.4 Poço de inspeção BR 392/RS km 174

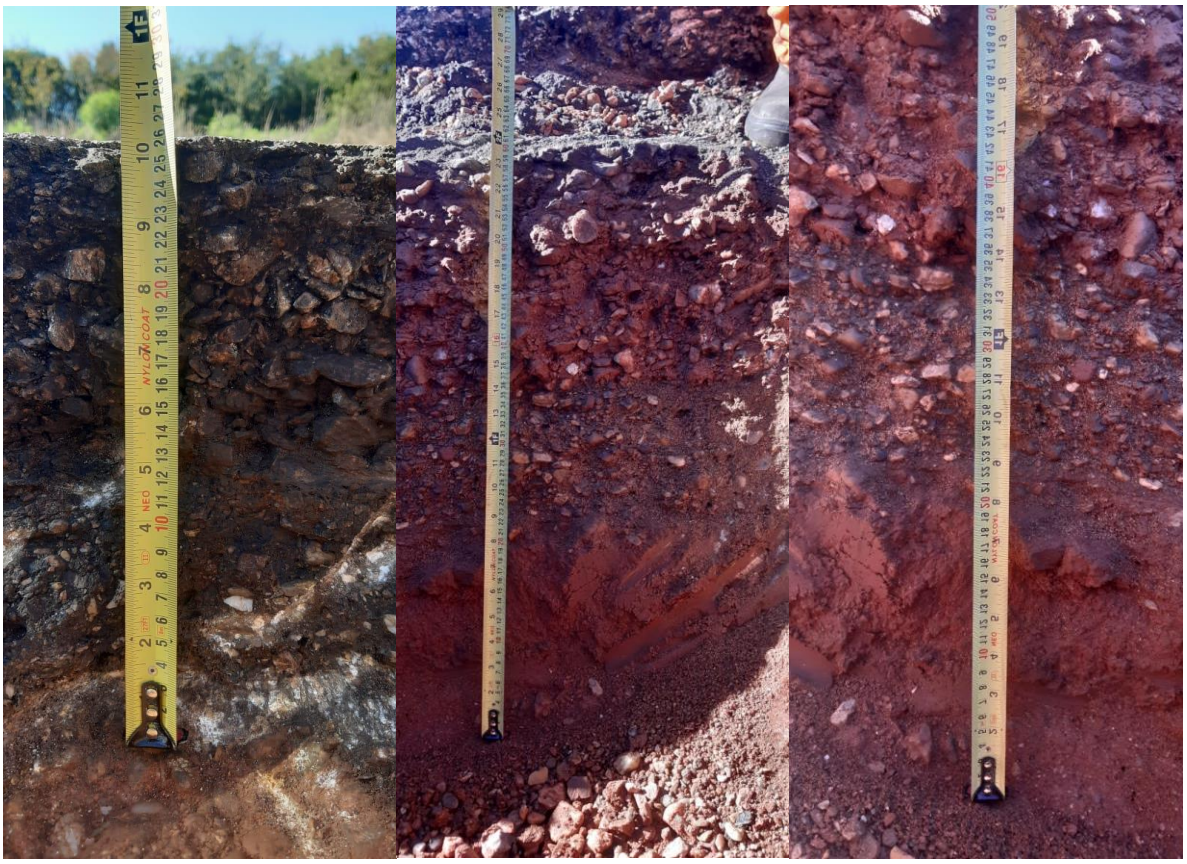
A abertura do poço de inspeção no km 174 da BR 392 também ocorreu em julho de 2023. A abertura do local também ocorreu com auxílio da “bobfresa” e posteriormente com a retroescavadeira. A Figura 89 apresenta a abertura do poço de inspeção.

Figura 89: Abertura Poço de inspeção km174 BR 392/RS



A partir da Figura 90 observa-se que não há a ocorrência de afundamentos de trilhas de roda tanto nas camadas de revestimento quanto de base negra. Ressalta-se o fato de o local ter sido construído em 2011.

Figura 90: Camadas revestimento BR 392/RS km 174



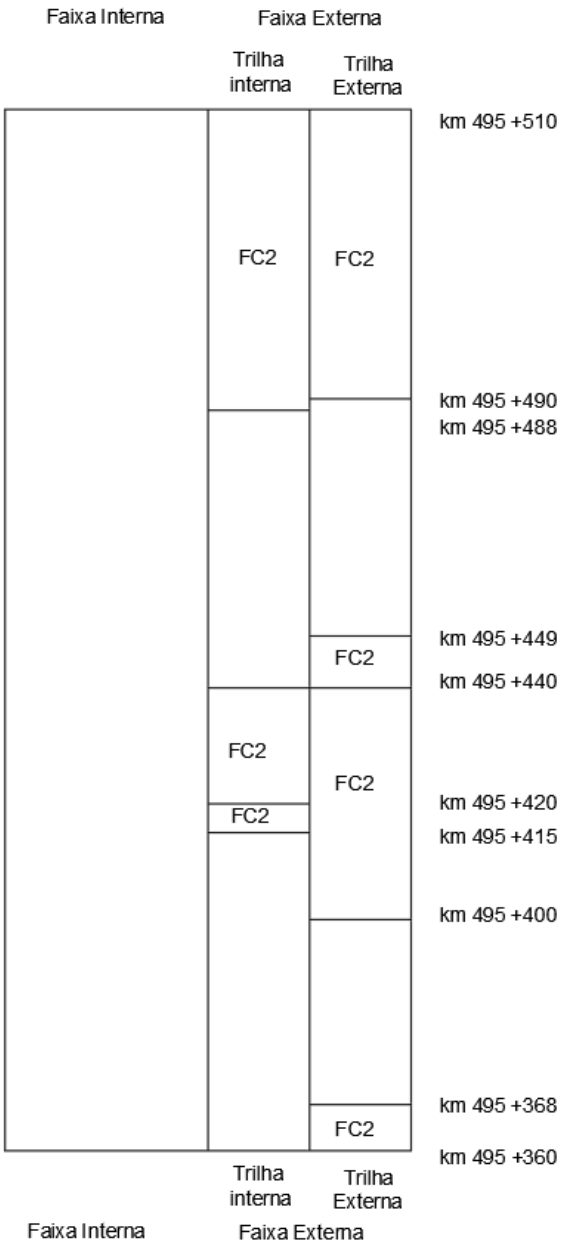
3.5.2.3 Avaliação das condições de superfície através de levantamento objetivo de defeitos

Foi realizado levantamentos da condição da superfície dos quatro trechos avaliados. Os levantamentos ocorreram na primeira semana do mês de julho de 2023 e na última semana do mês de dezembro de 2023.

3.5.2.3.1 Levantamento da condição de superfície BR 116/RS km 495

O trecho compreendido entre o km 495+360 ao km 495+540 foi levantado e avaliado nos dois períodos indicados. O trecho em questão é o objeto principal de estudos do RDT, sendo que o mesmo foi construído em janeiro de 2023. Constatou-se, no entanto, que o mesmo apresentou fissuras do tipo FC2 ao longo de seções isoladas. A Figura 91 apresenta o mapeamento das fissuras.

Figura 91: Mapeamento fissuras julho 2023



A Figura 92 apresenta as fissuras encontradas em 6 de julho de 2023. Pode-se observar que as mesmas se concentram nas trilhas de roda. No entanto, ao realizar medições com a treliça metálica, não há afundamento ocorrendo varrições das medições entre +1mm e -1mm ao longo de todo o trecho experimental.

Figura 92: Patologias km 495 BR 116/RS



Em agosto retornou-se ao trecho experimental e verificou-se que que não havia ocorrido evolução delas. Ressalta-se que as fissuras não ocorrem em todo o trecho experimental e sim em algumas porções. A Figura 93 apresenta o registro em 31 de agosto de 2023.

Figura 93: Patologias em agosto de 2023 BR 116/RS km 495



Para verificar as possíveis causas do surgimento das fissuras, realizou-se o poço de sondagem descrito no item anterior outubro de 2023, onde a possível causa de a fissuração ser por top-down, ou seja, não sendo originada pela BSM, que é o objeto de estudo do presente RDT. Contudo, serão realizados mais estudos para entender o surgimento dessas patologias.

Em dezembro de 2023, realizou-se uma nova avaliação do trecho experimental, onde as fissuras manterem-se nos mesmos locais mapeados na Figura 91, não apresentando evolução aparente, bem como não ocasionando afundamentos de trilha de roda no local, com a variação mantida entre +1,00 mm e - 1,1 mm. A Figura 94 apresenta o trecho experimental em dezembro de 2023.

Figura 94: Patologias km 495 BR 116/RS dezembro 2023



3.5.2.3.2 Levantamento da condição de superfície BR 116/RS km 417

Foi realizado em julho e dezembro o levantamento visual correspondente ao km 417 + 300 ao km 417+600 tanto no sentido Porto Alegre há Pelotas, quanto Pelotas a Porto Alegre. Por se tratar de um trecho de pista simples, houve a necessidade de interromper parcialmente o trânsito aplicando o sistema de siga e pare.

A Figura 95 apresenta o trecho monitorado. Observa-se que o mesmo não possui nenhuma patologia grave, apenas pequenos afundamentos por consolidação, algumas fissuras dos tipos FC1

e desgaste do pavimento. Ressalta-se que o mesmo foi construído em 2015, não sendo dado nenhum tipo de manutenção após a construção. A média dos afundamentos de trilha de roda ficou em 4mm.

Figura 95: Levantamento julho 2023 km 417 BR 116/RS



No mês de dezembro realizou-se novo levantamento, onde o trecho manteve-se com as mesmas condições apresentando somente afundamentos de trilha de roda por consolidação, pontos isolados com fissuras do tipo FC1 desgaste do pavimento. O afundamento de trilha de roda médio foi de 4,2mm. A Figura 96 apresenta o trecho referente em dezembro de 2023.

Figura 96: Levantamento km 417 BR 116/RS



3.5.2.3.3 Levantamento da condição de superfície BR 116/RS km 506

Realizou-se a avaliação na superfície no km 506 ao km 507 da BR 116/RS. Ressalta-se que este local foi executado em 2019. Pode-se observar que o local apresenta algumas trincas ao longo do trecho e afundamentos de trilha de roda, ficando em média de 12mm, tanto para o afundamento de trilha interno quando externo. A Figura 97 apresenta os afundamentos.

Figura 97: Afundamento de trilha de roda BR 116/RS km 506



A Figura 98 apresenta o local onde foi realizado o poço de inspeção, sendo desconsiderado para os levantamentos.

Figura 98: Local poço de inspeção BR 116/RS km 506



No levantamento realizado em dezembro de 2023, realizou-se uma nova avalição do trecho onde percebeu-se que além dos afundamentos de trilha de roda que permaneceram na casa dos 12,5mm, há alguns pontos onde consegue-se perceber alguns escorregamentos, como pode ser observado na Figura 99.

Figura 99: Patologias encontradas BR 116/RS km 506



3.5.2.3.4 Levantamento da condição de superfície BR 392/RS km 174

Realizou-se no Km 174 e 300 ao km 175 o levantamento visual do trecho no sentido Pelotas a Santana da Boa Vista. O trecho avaliado foi construído em 2011. Observa-se no trecho que há algumas fissuras no revestimento do tipo FC1, com pequenas marcações de trilhas de rodas. A Figura 100 apresenta o trecho, com foto tirada em dezembro de 2023.

Figura 100: Trecho avaliado BR 392 km 174



A avaliação realizada em julho de 2023 apresentou um afundamento médio de 0,05mm. Observou-se que alguns trechos, principalmente próximo aos taludes em corte, ao qual apresentam uma maior presença de patologias. Contudo por ser um trecho executado em 2011, a condição da superfície é boa, conforme verificado na Figura 101.

Figura 101: BR 392/RS km 174 avaliação próximo aos taludes em corte



Verificou-se também que por ser um trecho com um alto volume de tráfego de caminhões, que o trecho avaliado, não sofreu nenhuma intervenção recente, como observado na Figura 102, onde o trecho que segue para o porto, possivelmente, já sofreu algum tipo de intervenção principalmente devido a uma carga mais elevada dos caminhões. Consegue-se observar na Figura 10, também que o pavimento do local já sofreu algum desgaste.

Figura 102: Faixas BR 392/RS km 174



Em dezembro ao retornar para o trecho, não se observou aumento das patologias, visto que o local apresenta uma boa consolidação devido a data do projeto. Sendo que o afundamento médio de trilha de roda manteve-se em 5mm.

3.5.2.4 Avaliação Pista experimental “F” LAPAV/UFRGS

A pista experimental “F”, construída no LAPAV/UFRGS em parceria com a Rede Temática do Asfalto e Petrobras, destinada às avaliações do presente projeto de RDT, ainda não foi submetida aos ensaios no Simulador de Tráfego. No entanto, a pista é avaliada periodicamente por meio de

ensaios com o *Light Weight Deflectometer* (LWD), com o objetivo de monitorar suas condições estruturais. Na Figura 103, apresenta-se a realização de ensaios de LWD em dezembro de 2023.

Figura 103: Ensaios de Acompanhamento Pista experimental "F" LAPAV/UFRGS



3.5.3 Análise De Dados

No Relatório Parcial 2, foi iniciado o processo de análise de dados, etapa que será concluída integralmente ao término do projeto. Nos tópicos a seguir, são apresentados os itens já desenvolvidos no âmbito da análise de dados. Ressalta-se que os elementos ainda incompletos serão consolidados no Relatório Parcial 3 ou no Relatório Final, conforme o progresso das etapas, visando evitar redundâncias e garantir a organização e clareza das informações neste documento final.

3.5.3.1 Estudo dos critérios de ruptura de ambos os materiais em avaliação (base negra & RAP+AV+CP+EM) através dos parâmetros da superfície de Mohr e/ou Drucker-Prager.

A partir dos ensaios laboratoriais de ensaio de triaxial monotônico desenvolveu-se as curvas para determinação dos parâmetros de coesão e ângulo de atrito. Para ambos os casos escolheu-se utilizar os parâmetros a partir dos critérios de Mohr.

3.5.3.1.1 Avaliação dos critérios de ruptura para Base Negra

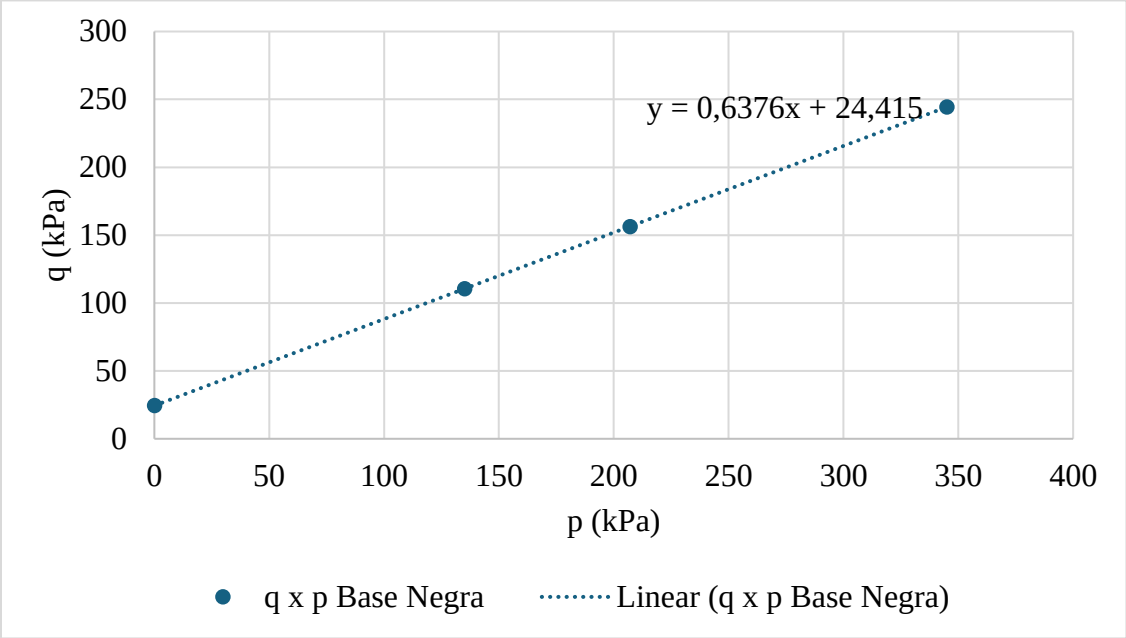
A realização dos ensaios referentes a base negra para obtenção dos parâmetros de coesão e ângulo de atrito seguindo os parâmetros de Mohr, já haviam sido desenvolvidos no RDT "AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE MISTURAS ASFÁLTICAS COM LIGANTE MODIFICADO POR BORRACHA USINADAS A TEMPERATURAS INTERMEDIÁRIAS E DE BASES NEGRAS USINADAS COM EMULSÃO ASFÁLTICA".
Três corpos de prova de 100x180mm, moldados no compactador giratório, foram submetidos cada um dos CP a uma tensão confinante, 25kPa, 50kPa e 100kPa. O diagrama p x q permitiu a obtenção dos parâmetros a e α, com os quais foi possível calcular os parâmetros de coesão (c) e ângulo de atrito (ϕ) apresentados na Tabela 12.

Tabela 12: Parâmetros triaxial monotônico Base Negra

a	α	C (kPa)	ϕ (º)
24,415	0,6376	36	48

A Figura 104 apresenta as trajetórias das tensões para a base negra considerando o diagrama q x p.

Figura 104: Trajetória de tensões base negra



3.5.3.1.2 Avaliação dos critérios de ruptura para BSM (RAP+AV+CP+EM)

A avaliação da BSM referente aos critérios de ruptura seguindo os parâmetros de Mohr, foram obtidos a partir da etapa laboratorial descrita no item 2.5, do presente relatório parcial. A Tabela 13 apresenta os parâmetros referência para a avaliação da BSM.

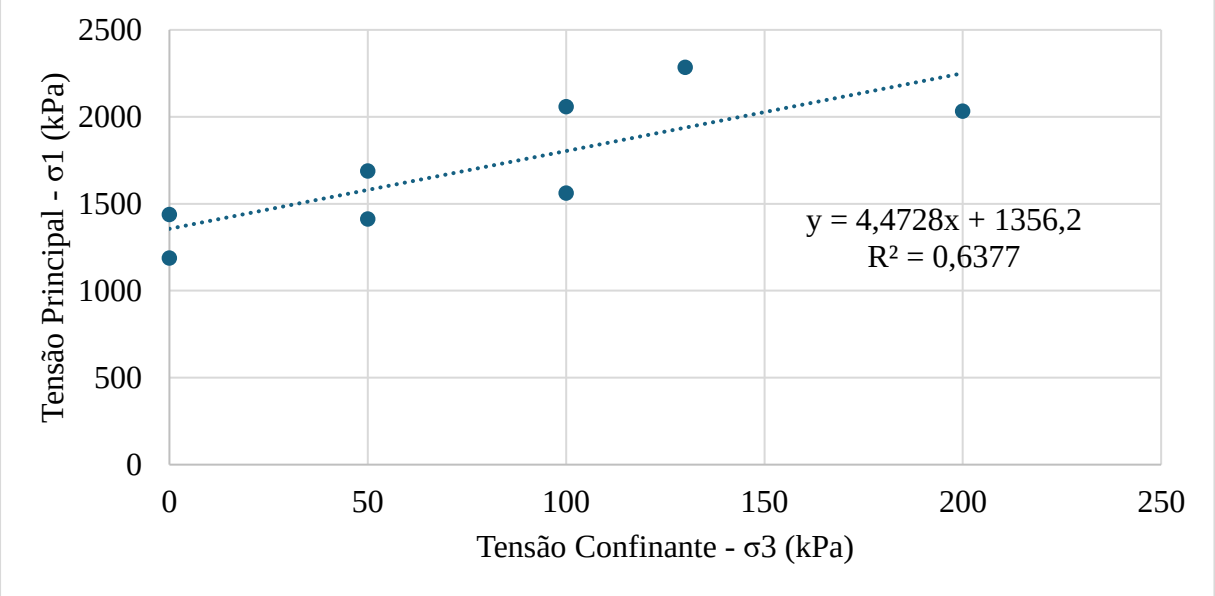
Tabela 13: Parâmetros de referência triaxial

Classificação	RAP (%)	ITS (kPa)		Triaxial		
		ITS Dry	ITS Wet	Coesão	Ângulo de Atrito	Coesão retida (%)
BSM 1	< 50%	225	125	250	40	75
	50 - 100%	225	125	265	38	75
BSM 2	< 50%	175	100	200	38	65
	50 - 100%	175	100	225	35	75

Fonte: Adaptado de TG2 (SABITA, 2020)

A Figura 105 apresenta a trajetória de tensões dos 10 corpos de prova ensaiados. Oberava-se que em um dos corpos de prova, não se conseguiu aplicar a tensão confinante de 200kPa, sendo o ensaio realizado há 130kPa.

Figura 105: Trajetória das tensões BSM



A Tabela 14 apresenta os parâmetros de cisalhamento obtidos a partir do ensaio de triaxial monotônico, obtido a partir da equação originada com os dados do ensaio. Para a obtenção das envoltórias plotou-se o resultado do ensaio de dez corpos de prova, submetidos a diferentes pares de tensão. A partir dos parâmetros referência da Tabela 13 e comparando com os resultados obtidos na Tabela 14, o ângulo de atrito obtido ficou muito próximo ao preconizados pelo TG2. Já a coesão obtida foi superior ao preconizado.

Tabela 14: Parâmetros triaxial monotônico BSM

Determinação dos parâmetros de cisalhamento (coesão e ângulo de atrito)		TG2
Inclinação da reta do modelo de ajuste (A)	4,47	-
Intercepto com eixo vertical (B)	1.356,20	-
Ângulo de atrito - φ	**39,39**	40,00
Coesão - c (kPa)	**320,63**	250,00

3.5.3.1.3 Avaliação dos critérios de ruptura

Comparando os resultados da base negra há qual obteve-se uma coesão de 36 kPa e um ângulo de atrito de 48°, a nova mistura utilizando uma granulometria com pó, ou seja, mais fechada se obteve um ângulo de atrito de 39,39° e uma coesão muito mais acentuada de 320,63 kPa.

Malysz (2004)obteve para brita graduada simples (Faixa A do DNIT) os seguintes valores c = 49 kPa e ângulo de atrito 60°. Já para brita uniforme (fora da qualquer faixa de base granular) os parâmetros foram c = 0 kPa e ângulo de atrito = 57°.

Os parâmetros de resistência ao cisalhamento da brita graduada ensaiada por Malysz (2004) são superiores aos da base negra, o que se justifica pelo fato da primeira ter granulometria contínua que conduz a maior valor de intercepto coesivo (c) e não apresenta ligante em sua composição, o que não reduz o ângulo de atrito interno.

Assim, a BSM apresenta uma coesão significativamente melhorada, comparando tanto a base negra, quanto para a brita graduada. Contudo, ressalta-se que mesmo obtendo uma coesão melhorada, ainda não chega a valores obtidos para concretos asfálticos. Para concretos asfálticos elaborados com ligantes convencional (Núñez et al., 2011) e modificado com SBS (Mattos et al., 2016), em ensaios realizados no LAPAV foram encontrados c = 480 kPa e φ = 46° e c = 1006 kPa e φ = 40°, respectivamente.

3.5.3.2 Curvas de acompanhamento de previsão de desempenho dos materiais em estudo com modelos de previsão de desempenho compatíveis

A partir dos ensaios desenvolvidos no Item 3.5.1.3, desenvolveu-se as curvas mestras do material estudado. A Tabela 15 apresenta os resultados obtidos no ensaio de modulo dinâmico.

Tabela 15: Resultados Obtidos no ensaio de modulo dinâmico

Temp. (°C)	Frequency (Hz)	φ médio (deg)	|E*| médio (kPa)	E(t) série de Prony	
4	25	14,3	7,86E+06	ρi(s)	Ei (kPa)
4	10	11,8	8,32E+06	2,00E+08	5,21E+04
4	5	9,6	8,01E+06	2,00E+07	1,36E+04
4	1	14,0	6,36E+06	2,00E+06	4,14E+04
4	0,5	15,7	5,78E+06	2,00E+05	6,54E+04
4	0,1	19,4	4,60E+06	2,00E+04	1,13E+05
20	25	15,6	5,05E+06	2,00E+03	1,93E+05
20	10	15,7	4,62E+06	2,00E+02	3,21E+05
20	5	14,8	4,21E+06	2,00E+01	5,14E+05
20	1	18,7	3,13E+06	2,00E+00	7,76E+05
20	0,5	20,6	2,77E+06	2,00E-01	1,09E+06
20	0,1	23,6	1,97E+06	2,00E-02	1,42E+06
40	25	18,8	2,12E+06	2,00E-03	1,71E+06
40	10	18,9	1,82E+06	2,00E-04	1,91E+06
40	5	19,4	1,57E+06	2,00E-05	2,00E+06
40	1	20,3	1,10E+06	2,00E-06	1,96E+06
40	0,5	20,4	9,55E+05	2,00E-07	1,83E+06
40	0,1	18,8	7,19E+05	2,00E-08	1,71E+06

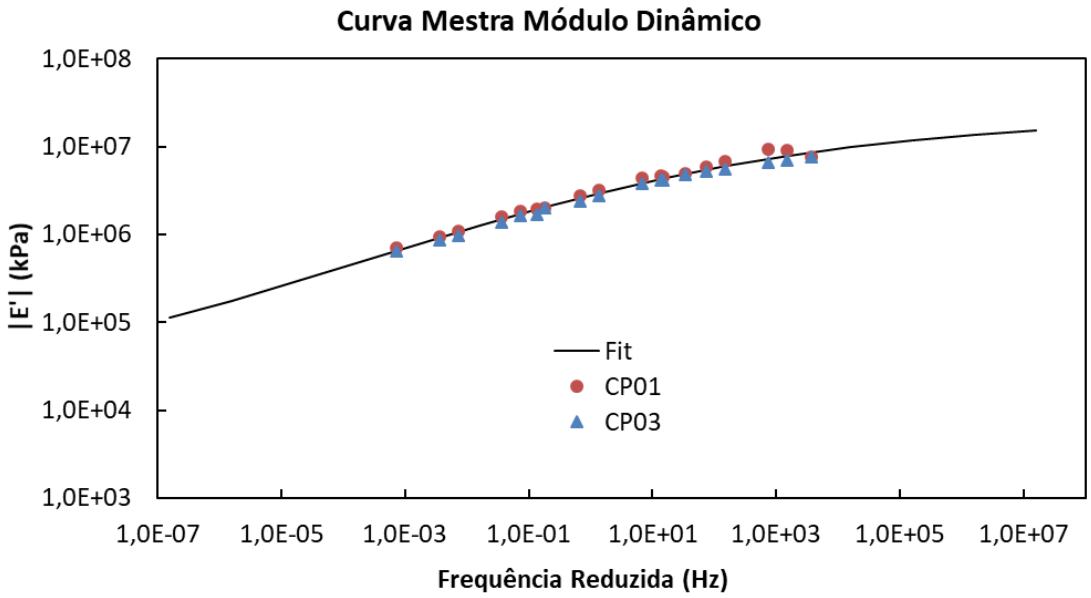
A partir dos ensaios, escolheu-se os CP's 1 e 3 para determinação da curva mestra. A Tabela 16 apresenta dos valores obtidos.

Tabela 16: Resultados CP's 01 e 03

Condição		CP01		CP03		Módulo dinâmico			Ângulo de fase		
Temp. (°C)	Frequência (Hz)	Módulo dinâmico (MPa)	Ângulo de fase (°)	Módulo dinâmico (MPa)	Ângulo de fase (graus)	**Média (MPa)**	Desv.Pad. (MPa)	CV (%)	**Média (graus)**	Desv.Pad. (graus)	CV (%)
4	25	8122	20	7591	8	**7857**	265,5	3,4	**14,3**	6,1	42,4
4	10	9532	16	7101	8	**8317**	1215,5	14,6	**11,8**	3,9	33,2
4	5	9398	10	6626	9	**8012**	1386,0	17,3	**9,6**	0,3	3,1
4	1	7046	17	5669	10	**6357**	689,0	10,8	**14,0**	3,5	25,2
4	0,5	6272	19	5289	12	**5780**	491,3	8,5	**15,7**	3,5	22,0
4	0,1	4890	23	4312	16	**4601**	288,7	6,3	**19,4**	3,2	16,5
20	25	5168	15	4939	16	**5054**	114,1	2,3	**15,6**	0,8	5,3
20	10	4889	17	4343	15	**4616**	273,1	5,9	**15,7**	1,0	6,1
20	5	4552	15	3878	15	**4215**	337,0	8,0	**14,8**	0,0	0,3
20	1	3367	19	2902	18	**3134**	232,3	7,4	**18,7**	0,6	3,0
20	0,5	2979	21	2568	20	**2774**	205,6	7,4	**20,6**	0,4	1,9
20	0,1	2114	24	1825	24	**1969**	144,5	7,3	**23,6**	0,0	0,0
40	25	2125	19	2122	18	**2124**	1,2	0,1	**18,8**	0,3	1,8
40	10	1914	19	1722	19	**1818**	96,2	5,3	**18,9**	0,3	1,5
40	5	1667	19	1464	20	**1565**	101,4	6,5	**19,4**	0,6	3,2
40	1	1163	20	1044	21	**1103**	59,6	5,4	**20,3**	0,3	1,3
40	0,5	996	20	914	21	**955**	40,7	4,3	**20,4**	0,1	0,5
40	0,1	745	19	692	19	**719**	26,2	3,6	**18,8**	0,2	1,3

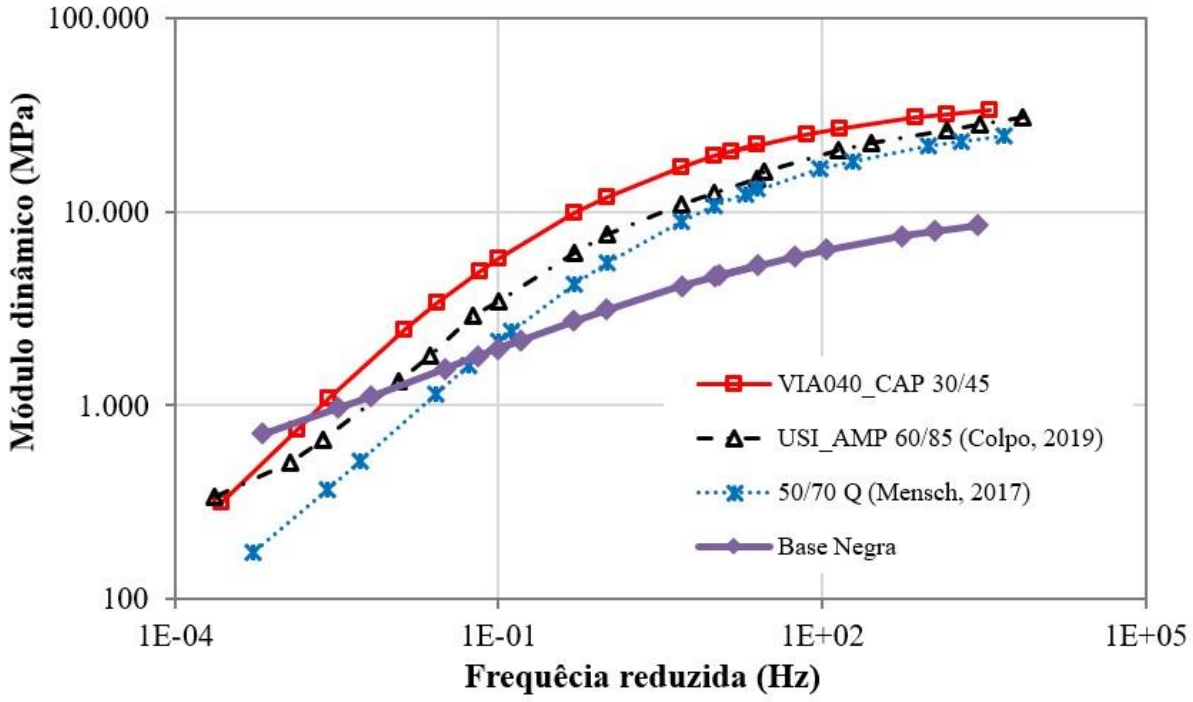
A Figura 106 apresenta a curva mestra obtida para o ensaio de modulo dinâmico.

Figura 106: Curva Mestra Módulo Dinâmico



A Figura 107 apresenta a curva mestra da BSM com relação a misturas asfálticas. Observa-se que a mesma não acompanha o comportamento de misturas asfálticas a quente.

Figura 107: Curva Mestra BSM x Curva mestra misturas Asfálticas



3.5.4 Participação em congressos e eventos

No período correspondente ao segundo relatório parcial julho-dezembro de 2023, ocorreu a participação em três eventos de grande destaque para a divulgação e difusão dos conhecimentos adquiridos ao longo da execução do presente RDT.

3.5.4.1 Enacor e 48° RAPv

O primeiro evento correspondeu a participação, apresentação e publicação do artigo intitulado "Reciclagem de pavimentos com emulsão asfáltica: efeito da granulometria e da compactação no comportamento resiliente" com DOI:10.29327/1304307.48-59, ANEXO IV, no 25º ENACOR – Encontro Nacional de Conservação Rodoviária e 48ª RAPv – Reunião Anual de Pavimentação, juntamente com a 4ª ExpoEnacor realizado presencialmente, de 19 a 22 de setembro de 2023, na cidade de Foz do Iguaçu, no Estado do Paraná.

A apresentação do artigo, foi realizada pela bolsista de iniciação cientifica do LAPAV, Katlin Modesto Dorneles, Figura 108 e Figura 109, e apresentação no ANEXO V.

Figura 108: Apresentação Artigo 25° ENACOR e 48° RAPv



Figura 109: Equipe do LAPAV 25° ENACOR e 48° RAPv



3.5.4.2 Workshop de Engenharia e Operação Viária de Pelotas

Aos 25 dias do mês de outubro de 2023, realizou-se o 1º Workshop de Engenharia e Operação Viária de Pelotas, promovido pela ECOSUL, ao qual participou-se do evento divulgando as pesquisas desenvolvidas no presente RDT. No ANEXO VI apresenta-se o folder do evento.

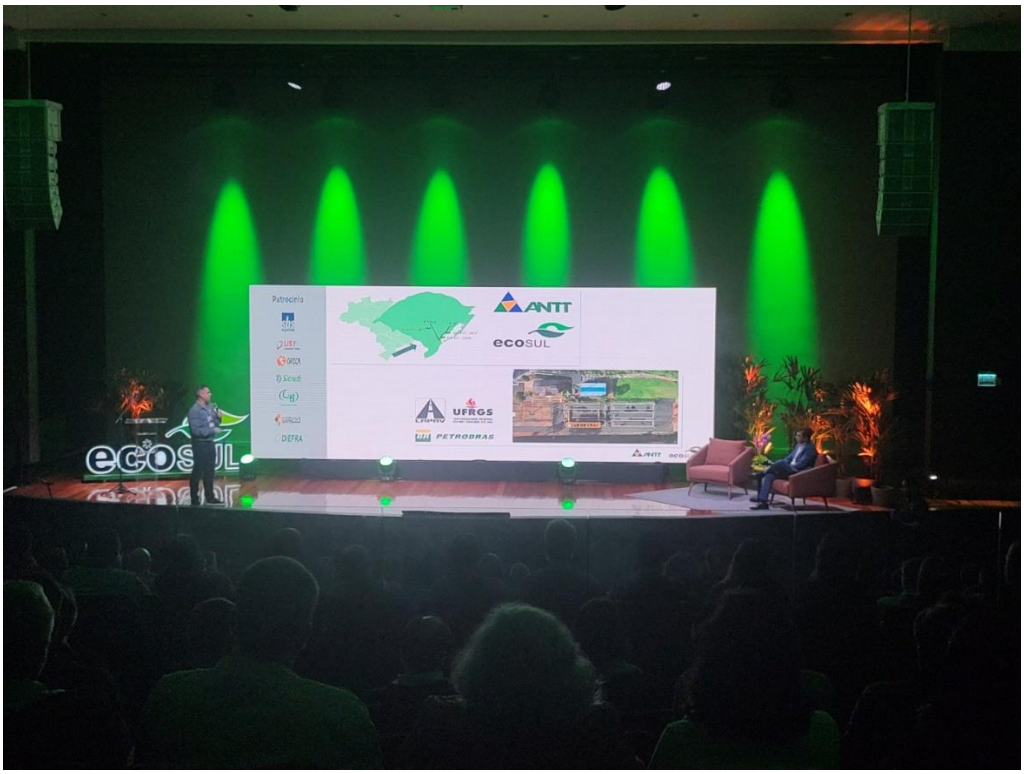
No presente evento, o professor Lélio Antônio Teixeira Brito, coordenador do projeto RDT no LAPAV, ministrou uma palestra juntamente com o Gerente de Infraestrutura Rodoviária do Grupo Ecorodovias Claudio Renato Castro Dias, intitulada “Projetos de CA com RAP e Bases estabilizadas com emulsão”, disponibilizada no ANEXO VII.

Referente ao projeto RDT, a palestras explanou os principais tópicos sobre BSM, comportamento mecânico, utilização e os avanços da pesquisa até o presente momento. A Figura 110 e Figura 111 retratam a apresentação e participação no workshop.

Figura 110: Participação no 1° Workshop de Engenharia e Operação Viária de Pelotas



Figura 111: Apresentação no 1° Workshop de Engenharia e Operação Viária de Pelotas



3.5.4.3 XIII Workshop RDT - Recursos para Desenvolvimento Tecnológico

No mês de dezembro, participou-se do “XIII WORKSHOP RDT – RECURSOS PARA DESENVOLVIMENTO TECNOLÓGICO” realizado junto a sede da ANTT em Brasília - DF. Durante o evento, além da participação nas palestras, um estande foi montado para a divulgação do Presente RDT. A Figura 112 apresenta o estande. Além da divulgação, os participantes do evento que vieram tirar suas dúvidas e visitar o estande receberam um folder com as informações sobre o desenvolvimento do projeto. O folder encontra-se no ANEXO VIII.

Figura 112: Estande XIII WORKSHOP RDT



3.6 Quadro Resumo – Atividades Previstas x Desenvolvidas

Atividades Previstas	Produtos Esperados	Atividades Executadas	Status das Atividades Executadas	Produtos Gerados
Etapa de Laboratório	- Relatório - Artigo - Iniciação cientifica - Tese de doutorado	Etapa de Laboratório	Concluídas conforme o previsto para o período	- Relatório - Artigo - Iniciação cientifica - Tese de Doutorado

Etapa de Campo	-Relatório	Etapa de Campo	Concluídas conforme o previsto para o período	- Relatório
Análise de dados	- Relatório	Etapa Análise de dados	Concluídas conforme o previsto para o período	- Relatório
Elaboração de relatórios	- Relatório	Elaboração de relatórios	Concluídas conforme o previsto para o período	- Relatório

3.7 Atividades Previstas para o Próximo Período (01/01/2024 a 30/06/2024)

Na sequência são listas as atividades previstas para serem realizadas no período que compreende o segundo semestre do projeto “Estudo de compósitos de cimento, emulsão com fresado asfáltico e agregados virgens para bases de elevado desempenho”.

1. Etapa de Campo
2. Análise de dados
3. Elaboração de relatórios
4. Minuta, Norma ou Instrução de Serviço
5. Workshop

4. TERCEIRO SEMESTRE DO PROJETO

4.1 Resumo

As atividades de execução do presente RDT iniciaram-se em janeiro de 2023. O presente item do relatório final refere-se ao terceiro semestre, abrangendo o período entre janeiro de 2024 a junho de 2024, conforme relatório parcial entregue em julho de 2024. As atividades previstas no Plano de Trabalho foram desenvolvidas de acordo com o cronograma físico-financeiro estabelecido.

4.2 Atividades previstas para o período

Para o período que contempla o terceiro semestre do projeto "Estudo de compósitos de cimento, emulsão com fresado asfáltico e agregados virgens para bases de elevado desempenho" estavam previstas para realização as seguintes atividades:

1. Etapa de Campo
2. Análise de dados
3. Minuta, norma ou instrução de serviço
4. Elaboração de relatórios
5. Workshop

4.3 Atividades executadas no período

Para o período que contempla o terceiro semestre do projeto "Estudo de compósitos de cimento, emulsão com fresado asfáltico e agregados virgens para bases de elevado desempenho" foram executadas as seguintes atividades:

1. Etapa de Campo

2. Análise de dados
3. Minuta, norma ou instrução de serviço
4. Elaboração de relatórios
5. Workshop

4.4 Justificativas

Todas as atividades previstas foram executadas conforme cronograma físico-financeiro.

4.5 Descrição das atividades desenvolvidas

O terceiro semestre do projeto " Estudo de compósitos de cimento, emulsão com fresado asfáltico e agregados virgens para bases de elevado desempenho ", compreendido entre os meses de janeiro a junho de 2024, transcorreu conforme o previsto no cronograma. As atividades desenvolvidas incluíram a realização da etapa de campo, análise de dados, minuta de norma, elaboração de relatórios e workshop. A seguir, são descritas as atividades executadas no terceiro semestre.

4.5.1 Etapa de Campo

No relatório parcial 3, concluiu-se a etapa de campo de todos os itens, conforme o cronograma físico-financeiro e plano de trabalho. Dentro da etapa de campo, abordou-se o acompanhamento das pistas experimentais. As pistas com principal relevância para o presente RDT são:

- Pista BR 116/RS km 495, execução em janeiro de 2023;

- Pista experimental F, executada no LAPAV/UFRGS em janeiro de 2023.

Ambas as pistas foram executadas considerando a dosagem BSM-EARP-nE, composta por 32,0% fresado (granulometria não extraída) + Agregado Virgem, 28% de brita 1 ½” + 39,0% pó de pedra,

+ 1% de Cimento Portland CP-IV + 2,0% de teor residual da Emulsão EARP. O teor de umidade de projeto corresponde a 7,9% e a densidade máxima obtida em laboratório, nos ensaios de compactação, corresponde a 2,069 g/cm³ na energia modificada.

O processo de execução da pista experimental da BR-116/RS km 495 decorreu de fresagem de 18 cm de material, e recomposição com 13 cm de BSM + 5 cm de revestimento. Já a Pista F foi construída nova, sendo o material transportado da usina localizada na cidade de Capão do Leão/RS para Porto Alegre/RS.

4.5.1.1 Acompanhamento da evolução das condições de deformabilidade através do uso de ensaios deflectométricos com FWD em campanhas trimestrais

As campanhas de *Falling weight deflectometer* (FWD) de múltiplas cargas ocorreram nos meses de janeiro de 2024 e abril de 2024. Ressalta-se que estas campanhas são complementadas, pelas já realizadas nos meses de junho de 2023 e outubro de 2023. Adicionalmente, os dados referentes a campanha anual de FWD do ano de 2023, foi utilizada, para ser o marco zero para o trecho BR 116/RS km 495.

Como já mencionado no Item 3.5.2.1, houve uma retificação com relação aos trechos descritos no relatório do RDT, sendo os trechos correspondentes a monitoração com o FWD de múltiplas cargas, os seguintes trechos experimentais:

- BR-392/RS km 174+300 ao km 175+000, com execução em 2011;
- BR-116/RS km 417+400 ao km 417+600, com execução em 2015;
- BR-116/RS km 506+00 ao km 507+ 000, com execução em 2019;
- BR-116/RS km 495+360 ao km 495+540, com execução em janeiro de 2023.

A execução do FWD foi realizada por uma empresa terceirizada contratada pela ECOSUL nos meses citados anteriormente, em campanhas trimestrais. A execução desta campanha de FWD ocorreu de maneira especial para o monitoramento e acompanhamento das pistas. O procedimento foi realizado ao longo de todo o trecho experimental, com múltiplas cargas e leituras a cada 20 metros. Como referência para avaliação da não linearidade do comportamento do material, seguiu-

se as cargas utilizadas pela Federal Highway Administration (2000), conforme a Tabela 8. As Figura 113, Figura 114, Figura 115, Figura 116 apresentam a execução dos ensaios de FWD ao longo das quatro campanhas executadas ao longo dos trechos monitorados.

Figura 113: Execução FWD BR 116/RS km 506



Figura 114: Execução FWD BR 392/RS km 174



Figura 115: Execução FWD BR 116/RS km 417



Figura 116: Execução FWD BR 116/RS km 495



As análises dos dados de FWD para a base estabilizada estão apresentadas no Item 4.5.2.1 do deste relatório final. Para o levantamento de junho de 2023, houve o corrompimento dos dados referente ao trecho da BR-116/RS km 495.

4.5.1.2 Intervenção BR 116/RS km 495

Em fevereiro de 2024, foi necessária uma intervenção de grande escala no trecho experimental deste RDT, localizado no km 495 da BR-116/RS, devido à alta fissuração observada. A camada de revestimento asfáltico, aplicada sobre a camada reciclada com emulsão, foi removida para evitar infiltração de água que poderia comprometer a camada de base.

A análise realizada, incluindo sondagens de outubro de 2023 e retroanálises apresentadas no Item 4.5.1.3 e no Item 4.5.2.1 respectivamente, confirmando que a fissuração não estava relacionada à camada de base, mas sim ao revestimento. Assim, optou-se por substituir os 5 cm da camada de revestimento asfáltico. A Figura 117 apresenta a superfície deteriorada antes da intervenção, enquanto a Figura 118 apresenta o procedimento de remoção de 5cm da camada de revestimento.

Figura 117: Estada do Revestimento antes da fresagem



Figura 118: Fresagem Intervenção km 495 BR116/RS



A remoção da camada de revestimento teve como objetivo também avaliar a condição do topo da camada de base. A Figura 119 ilustra o estado do topo da camada após a realização da fresagem e da limpeza. Com base na avaliação visual, constatou-se que a camada de base permaneceu totalmente íntegra, sem apresentar fissuras ou deformações por afundamento.

Figura 119: Topo da Camada de BSM





A recomposição foi realizada utilizando uma massa asfáltica morna, aplicada sobre uma pintura de ligação previamente executada na superfície da base. A Figura 120 apresenta a pintura executada sobre a base, enquanto a Figura 121 ilustra o processo de execução do revestimento.

Figura 120: Pintura de ligação sobre BSM



Figura 121: Execução do Revestimento



Ainda no âmbito dessa intervenção, foi realizado um poço de sondagem, que será detalhado no Item 4.5.1.3. Destacam-se dois pontos importantes decorrentes dessa intervenção:

- Identificou-se que mesmo com a camada de revestimento fissurada, a camada de base estabilizada com emulsão e fresado, manteve-se integra e sem fissuras visualmente perceptíveis.
- A remoção completa da camada de revestimento permitiu comprovar que as fissuras ocorreram exclusivamente nesta camada, atribuídas a trincas Top Down, as quais não são comuns na região Sul. Estão em andamento investigações paralelas para determinar as causas dessas fissuras no trecho em questão, bem como para verificar se a ocorrência será repetida após a substituição do revestimento ou se tratou de uma condição isolada

4.5.1.3 Realização de poço de sondagem

A realização de poços de sondagem nos trechos experimentais estava prevista em projeto. Para isso, executou-se juntamente com a intervenção no trecho experimental da BR 116/RS km 495, em fevereiro de 2024, a abertura de um poço de sondagem de modo a avaliar as camadas que compunham tanto a pista de rolamento quanto o acostamento. A abertura ocorreu na trilha de roda externa para assim também conseguir-se avaliar se havia a presença de afundamentos de trilha de roda. A Figura 122 demonstra a abertura da trincheira, observa-se que primeiramente utilizou-se a fresadora para remover a camada de BSM devido a sua rigidez e não danificar a mesma lateralmente. A abertura da trincheira ocorreu aproximadamente na posição 495+420.

Figura 122: Abertura da trincheira BR 116/RS km 495 – fresa camada de base



A Figura 123 apresenta a escavação da trincheira até a camada de sub-base. A partir da escavação, constatou-se que a presença de água nas camadas mais inferiores, o que pode contribuir para o processo de deterioração das camadas do pavimento. Em futuros trechos experimentais, será proposta a avaliação e inserção de sensores de umidade como forma de monitoramento da presença de água e seu impacto nas camadas de base estabilizadas com emulsão, bem como nas demais camadas

Figura 123: Abertura da trincheira BR 116/RS km 495 – escavação



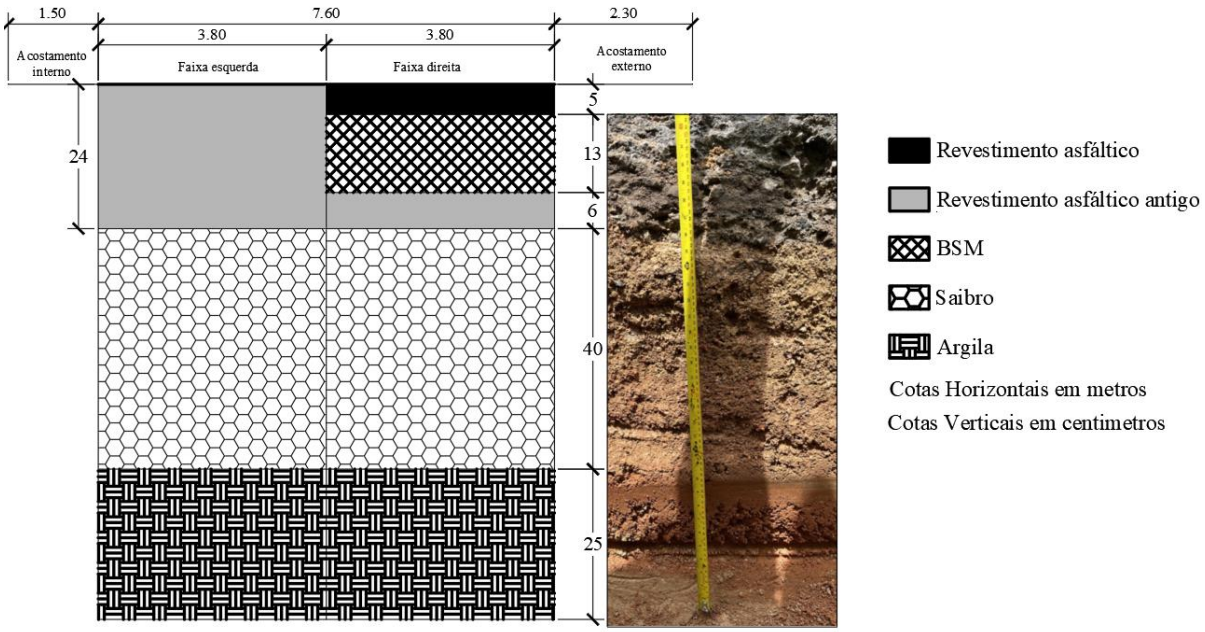
Observou-se visualmente que o material que compõe a camada de subleito apresenta uma fragilidade considerável, com características de baixa resistência mecânica. A Figura 124 ilustra o material encontrado no subleito do trecho experimental, evidenciando sua composição e condição.

Figura 124: Material de Subleito trecho experimental



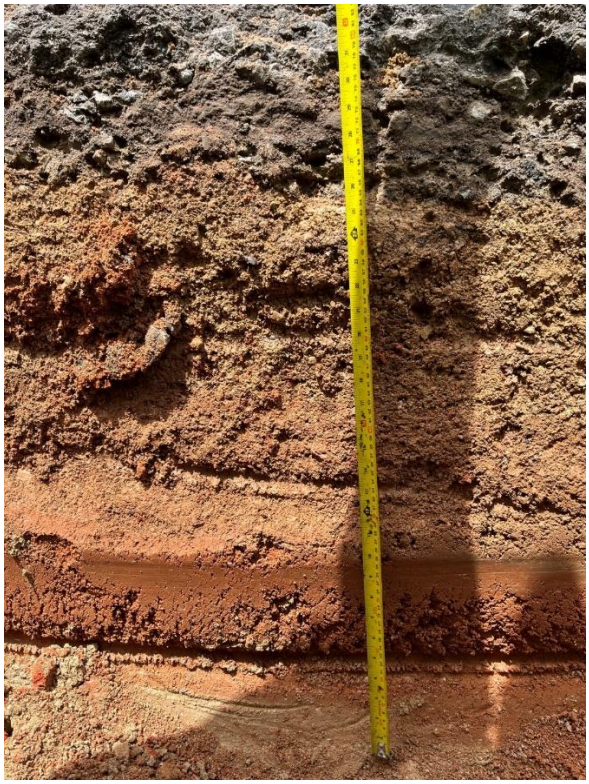
Adicionalmente, foi possível realizar um corte no trecho experimental, onde se constatou a ausência de trilhas de rodas, bem como a verificação das espessuras das camadas que o compõem. A Figura 125 presenta essas camadas, complementada por um desenho esquemático que representa os materiais e suas dimensões. Ressalta-se também que, neste perfil, a camada de revestimento está ausente, pois havia sido fresada para a intervenção no trecho experimental.

Figura 125: Estrutura do pavimento - BR116/RS km 495



Na Figura 126 apresenta-se de maneira ampliada o perfil das camadas que compõem a pista de rolamento.

Figura 126: Perfil do pavimento - BR116/RS km 495



Observa-se que não ocorreu deformação no trecho avaliando, considerando que o mesmo, foi construído em janeiro de 2023, no início do projeto. Assim, o trecho continuará a ser monitorado, juntamente com os demais, como forma integrante da tese de Doutorado de Leonardo Lunkes Wagner.

Devido à abertura da trincheira ter na interface entre o acostamento de faixa de rolamento (trilha de roda), foi possível identificar os materiais que compõem o acostamento e suas camadas, conforme observa-se na Figura 127. Observa-se que o material que compõem o acostamento é diferente do material que compõem as camadas das pistas de rolamento identificados na Figura 126. Essa diferenciação de material, talvez também tenha contribuído para a entrada de água nas camadas inferiores, e prejudicada o desempenha da camada de revestimento asfáltico da pista de rolamento.

Figura 127: Perfil acostamento BR 116/RS km 495



Para os demais trechos, optou-se por não realizar uma nova abertura de poços de sondagem, devido a já consolidação dos trechos, por serem mais antigos.

4.5.1.4 Avaliação das condições de superfície através de levantamento objetivo de defeitos

Todos os levantamentos visuais foram realizados pela equipe do LAPAV, com o auxílio dos colaboradores da ECOSUL, que permitiram o trabalho seguro. Os levantamentos ocorreram em dias de condição climática favorável nos meses de janeiro e julho de 2024.

Levantamento da condição de superfície BR 116/RS km 495

Em janeiro de 2024 retornou-se ao trecho para realizar as avalições visuais do trecho, onde constatou-se o aumento da fissuração, **Figura 128**, quando comparado as fissuras já identificadas em levantamentos anteriores no item 2.5.3. Mesmo verificando aumento da fissuração, não se constatou aumento do afundamento de trilha de roda utilizando medições com a treliça.

Figura 128: Levantamento visual janeiro de 2024 BR116/RS km 495



A Figura 129, apresenta o levantamento com a treliça realizado para verificação do afundamento de trilha de roda em janeiro de 2024. Observou-se que mesmo possuindo fissuras, não havia afundamentos significativos ao longo do trecho ou localizado.

Figura 129: Levantamento afundamento de trilha de roda com treliça



O levantamento foi realizado a cada 20m, a fim de se obter mais dados sobre o trecho. Após a avaliação, obteve-se uma classificação com conceito Ruim de IGG, com um afundamento médio de 1,8mm para a trilha interna e 2,2mm para a trilha externa. Contudo, devido a elevada fissuração, decidiu-se pela substituição do revestimento asfáltico no trecho. A Tabela 17 apresenta os resultados do levantamento de IGG para o mês de janeiro de 2024.

Tabela 17: Resultado IGG Jan/24 - BR-116/RS km 495

ITEM	Natureza do Defeito	Frequência Absoluta	Frequência Absoluta Considerada	Frequência Relativa	Fator de Ponderação	Índice de Gravidade Individual	Obs:
1	Trincas Isoladas (Fl, TTC, TTL, TLC, TLL, TRR)	9	0	0%	0,2	0,0	
2	(FC-2) J, TB	9	0	0%	0,5	0,0	
3	(FC-3) JE, TBE	9	9	100%	0,8	80,0	
4	ALP, ATP, ALC, ATC	0	0	0%	0,9	0,0	
5	O, P, E	0	0	0%	1,0	0,0	
6	EX	0	0	0%	0,5	0,0	
7	D	1	1	11%	0,3	3,3	
8	R	0	0	0%	0,6	0,0	
9	Média Aritmética dos valores médios das flechas medidas em mm nas TRI e TRE	TREm = 2,277777778	TRIm = 1,833333333	F = (TRIm + TREm)/2 2,055555556	1A (x) 1B ( )	2,7	
10	Média aritmética das variâncias das flechas medidas em ambas as trilhas	TREv = 2,694444444	TRIv = 1,625	Fv = (TRIv + TREv)/2 2,159722222	2A (x) 2B ( )	2,2	
No. Total de Estações: n=		9	S Índice de Grav. Indiv = IGG			88	Conceito: Ruim
1A) IGI = F x 4/3 quando F ≤ 30 2A) IGI = FV quando FV ≤ 50 1B) IGI = 40 quando F > 30 2B) IGI = 50 quando FV > 50							

Em um novo levantamento em junho de 2024, Figura 130, devido a troca de revestimento, ocorrida na intervenção ocorrida em fevereiro de 2024, apresentada nos itens anteriores, obteve-se uma classificação IGG Ótima, com afundamento de trilha de roda média na casa dos 1mm tanto para a trilha de roda interna quanto externa. A **Tabela 18** apresenta os dados de IGG levantados para o trecho.

Figura 130: Levantamento visual junho de 2024 BR116/RS km 495



Tabela 18: Resultado IGG Jun/24 - BR-116/RS km 495

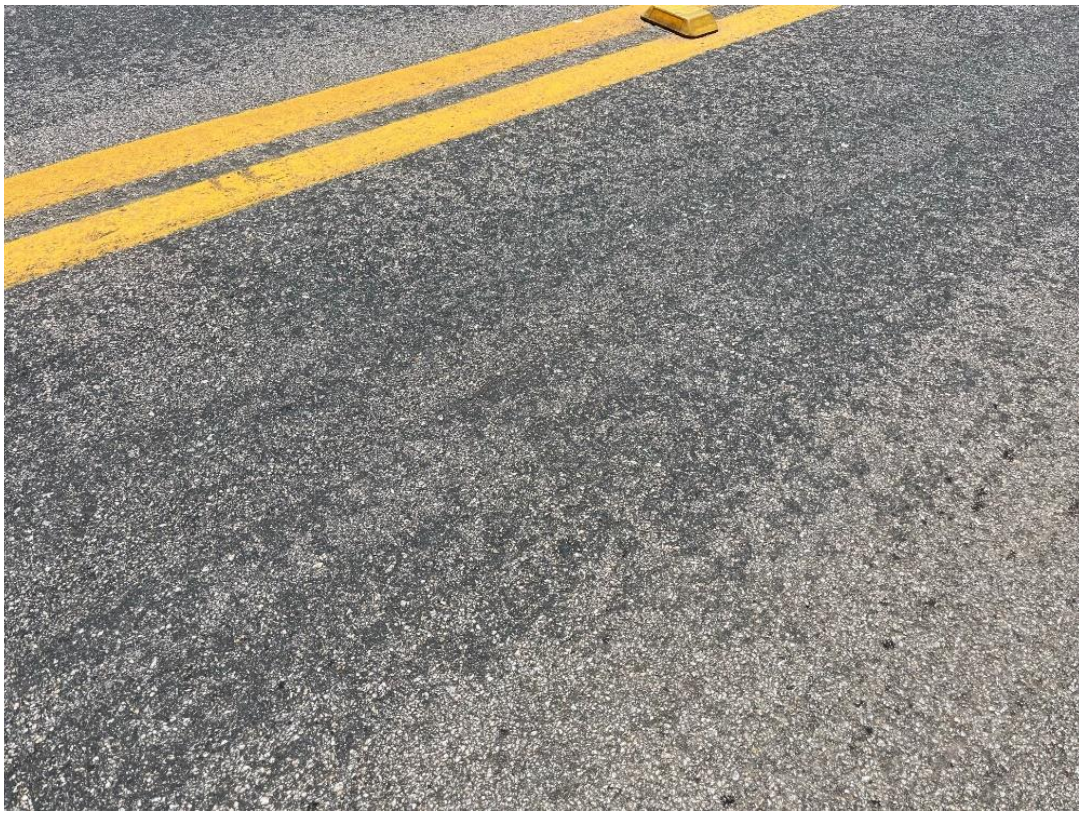
ITEM	Natureza do Defeito	Frequência Absoluta	Frequência Absoluta Considerada	Frequência Relativa	Fator de Ponderação	Índice de Gravidade Individual	Obs:
1	Trincas Isoladas (Fl, TTC, TTL, TLC, TLL, TRR)	0	2	22%	0,2	4,4	
2	(FC-2) J, TB	0	0	0%	0,5	0,0	
3	(FC-3) JE, TBE	0	0	0%	0,8	0,0	
4	ALP, ATP, ALC, ATC	0	0	0%	0,9	0,0	
5	O, P, E	0	0	0%	1,0	0,0	
6	EX	0	0	0%	0,5	0,0	
7	D	0	0	0%	0,3	0,0	
8	R	0	0	0%	0,6	0,0	
9	Média Aritmética dos valores médios das flechas medidas em mm nas TRI e TRE	TREm = 0,755555556	TRIm = 0,655555556	F = (TRIm + TREm)/2 0,705555556	1A (x) 1B ( )	0,9	
10	Média aritmética das variâncias das flechas medidas em ambas as trilhas	TREv = 0,400277778	TRIv = 0,165277778	Fv = (TRIv + TREv)/2 0,282777778	2A (x) 2B ( )	0,3	
No. Total de Estações: n=		9	S Índice de Grav. Indiv = IGG			6	Conceito: Ruim
1A) IGI = F x 4/3 quando F ≤ 30 1B) IGI = 40 quando F > 30		2A) IGI = FV quando FV ≤ 50 2B) IGI = 50 quando FV > 50					

Levantamento da condição de superfície BR 116/RS km 417

Realizou-se em janeiro de 2024 e junho 2024, o levantamento correspondente ao km 417 + 300 ao km 417+600 tanto no sentido Porto Alegre a Pelotas (pista Sul), quanto no sentido contrário (pista

Norte). Por se tratar de um trecho de pista simples, houve a necessidade de interromper parcialmente o trânsito aplicando o sistema de siga e pare. A Figura 131 apresenta um segmento do trecho monitorado.

Figura 131: Levantamento visual km 417 BR 116/RS



A Figura 132 apresenta o levantamento dos afundamentos. Observa-se que o mesmo não possui nenhuma patologia grave, apenas pequenos afundamentos por consolidação, algumas fissuras do tipo FC1 e desgaste do pavimento. Ressalta-se que o trecho foi construído em 2015, não sendo dado nenhum tipo de manutenção após a construção. Para o mês de janeiro, a média dos afundamentos de trilha de roda ficou em 4mm para a pista sentido Porto Alegre/Pelotas e em 2,5mm, mantendo a tendência dos meses anteriores, tanto para a leitura de janeiro quanto para a leitura e junho de 2024. A classificação do IGG para as duas situações foi regular, mantendo-se também para o mês de junho de 2024.

Figura 132: Levantamento janeiro 2024 km 417 BR 116/RS



Levantamento da condição de superfície BR 116/RS km 506

Realizou-se a avaliação na superfície no km 506 ao km 507 da BR 116/RS. Ressalta-se que este trecho foi executado em 2019. Pode-se observar que o local apresenta algumas trincas ao longo do trecho e afundamentos de trilha de roda, ficando em média de 2,8 mm para ambas as trilhas e monitorações. A Figura 133 apresenta os afundamentos encontrados nos levantamentos anteriores, também apresentada Item 3.5.2.3.

Figura 133: Afundamento de trilha de roda BR 116/RS km 506



A redução dos afundamentos frente ao levantamento anterior deveu-se a intervenções que ocorreram no trecho, levando ao melhoramento das condições, conforme observado na Figura 134. Mesmo após a intervenção, a classificação do IGG segue como ruim, devido a pequenos desgastes e remendos.

Figura 134: Intervenção de pavimento BR 116 KM 506 janeiro de 2024



A Figura 135 apresenta o levantamento ocorrido em junho de 2024. Ressalta-se que a leitura do afundamento de trilha de roda ocorreu fora das áreas que sofreram intervenção.

Figura 135: Levantamento julho 2024 BR 116/RS km 506



L***evantamento da condição de superfície BR 392/RS km 174***

Realizou-se entre os km 174+300 ao km 175+00 da BR-392/RS o levantamento do trecho no sentido Pelotas a Santana da Boa Vista. O trecho avaliado foi construído em 2011. Observa-se no trecho que há algumas fissuras no revestimento do tipo FC1, mantendo as condições de superfície ao qual já havia sido observado no relatório parcial anterior, com pequenas marcações de trilhas de rodas. A Figura 136 apresenta o trecho, com foto tirada em janeiro de 2024.

Figura 136: Trecho avaliado BR 392 km 174



Em ambas as avaliações de janeiro de junho de 2024, o afundamento médio observado foi de 5mm para ambas as trilhas de roda, com classificação IGG Ruim. O trecho avaliado em questão, é rota do interior do Estado do Rio Grande do Sul ao Porto de Rio Grande, logo, apresenta um alto volume de tráfego. Mesmo com esse agravante, o trecho não sofreu nenhuma intervenção recente, como observado na Figura 137. Contudo, devido a isso, consegue observar que o trecho apresenta um certo desgaste do pavimento, devido a sua idade.

Figura 137: Faixas BR 392/RS km 174



Na Figura 138 apresenta-se o procedimento de avaliação de trilha de roda no km 174+600 da BR 392/RS. O levantamento ocorreu a cada 40, conforme definido em norma.

Figura 138: Levantamento trilha de roda Km 174 BR 392/RS



4.5.1.5 Avaliação dos resultados dos levantamentos visuais

Como comentado nos itens de levantamentos as avaliações das condições de superfície foram realizadas e finalizadas para o período. Ressalta-se que os trechos construídos anteriormente ao RDT não sofreram mudanças significativas no período de avaliação, principalmente por já estarem consolidados.

O trecho que mais sofreu alterações ao longo da avaliação, o que levou a necessidade de intervenções foi o construído no presente RDT, correspondente ao km 495 da BR-116/RS, devido à substituição do revestimento asfáltico ocorrida em fevereiro de 2024.

No km 506 da BR-116/RS, a concessionária ECOSUL precisou realizar pequenas intervenções devido a pontos localizados de afundamento de trilha de roda. No entanto, essas intervenções não interferiram nem impactaram na avaliação global do trecho avaliado.

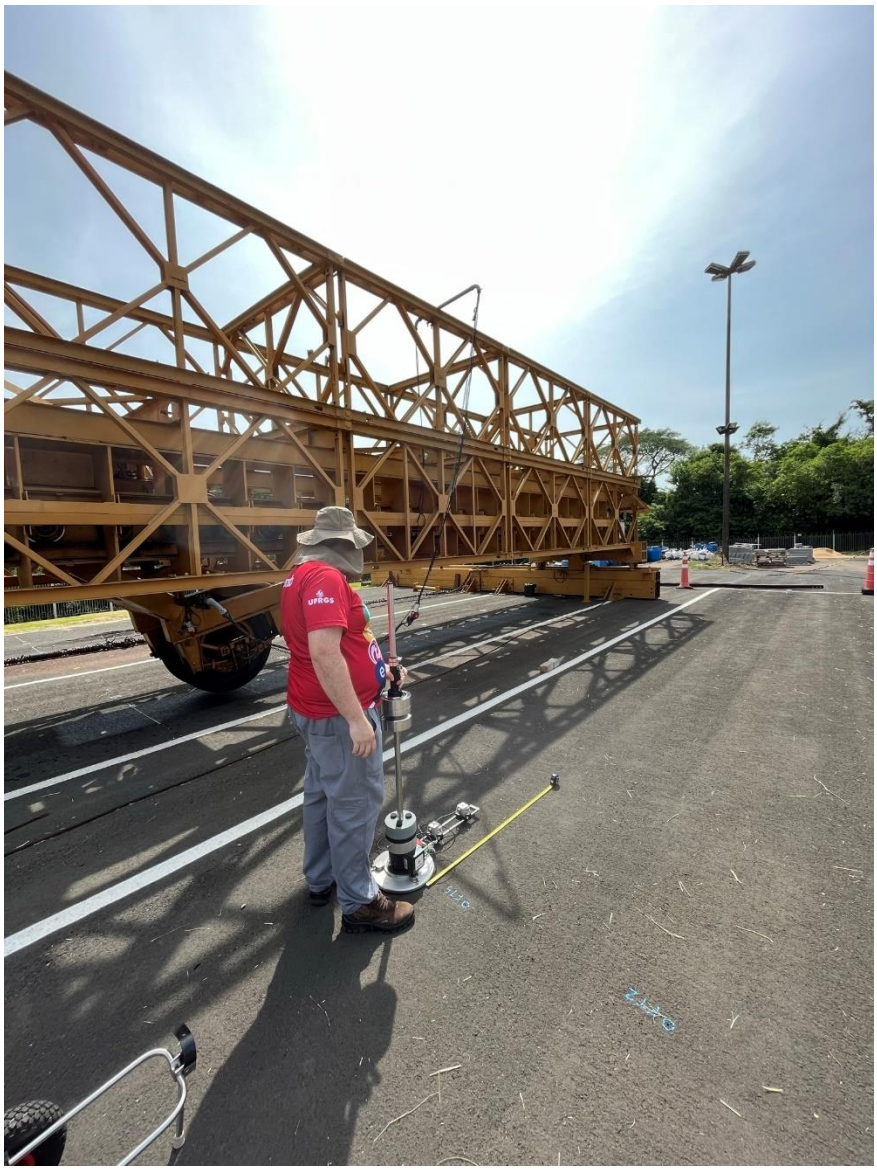
Os km 417 da BR-116/RS e 174 da BR-392/RS não sofreram qualquer intervenção, sendo que pequenas alterações nas avaliações se verificaram no trecho, mostrando que o comportamento dos pavimentos utilizando técnicas de bases estabilizadas apresentam boa durabilidade. Estes trechos foram construídos em 2015 e 2011, respectivamente. Certamente, pequenas intervenções nesses trechos foram realizadas ao longo dos anos, contudo, nenhuma ao longo do presente RDT.

Assim, conclui-se que os trechos se mantêm constantes em termos de serventia, mesmo apresentando pequenos defeitos que foram corrigidos, garantindo segurança ao usuário. Quando surgiram defeitos, eles não foram decorrentes da base estabilizada, mas sim de efeitos no revestimento, como desgaste ou fissuras.

4.5.1.6 Avaliação Pista Experimental “F” LAPAV/UFRGS

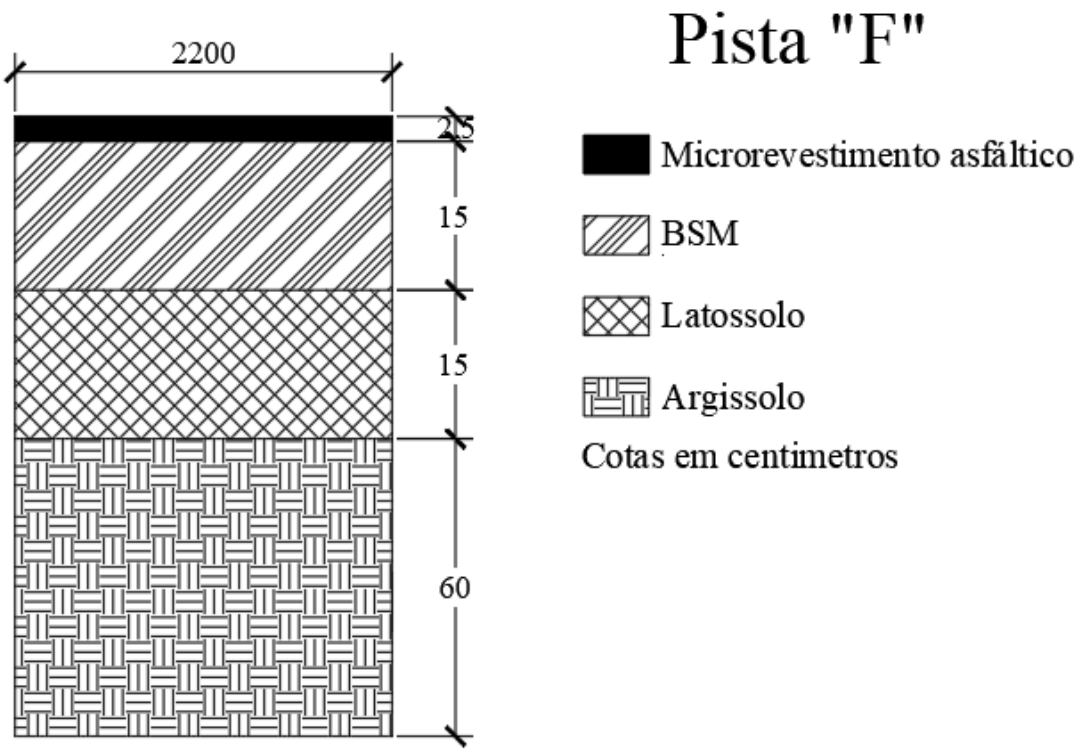
O acompanhamento da pista Experimental “F”, no LAPAV/UFRGS em parceria com a Rede de Tecnologia do Asfalto, foi executado no presente período, sendo ensaiada uma de suas duas trilhas, denominada trilha bento, entre os meses de janeiro e abril de 2024. A mesma foi avaliada durante a aplicação de cargas do simulador, com o auxílio do *Light Weight Deflectometer* (LWD), para acompanhamento das deflexões ao longo dos ciclos, bem como verificado os afundamentos de trilha de roda com o auxílio de um perfilógrafo. A Figura 139 apresenta o levantamento inicial antes do ensaio da pista F trilha bento.

Figura 139: Ensaios de Acompanhamento Pista experimental "F" LAPAV/UFRGS



A Figura 140 apresenta as camadas que compõem a pista F. Observa-se que sobre a camada de BSM, há somente uma fina camada de microrrevestimento asfáltico, que não possui função estrutural, sendo somente uma proteção contra a penetração de água das camadas do pavimento avaliado.

Figura 140: Estrutura Pista "F"



No dia 10 de janeiro de 2024, um ano após a execução da base estabilizada com emulsão e fresado, fruto do trabalho do presente RDT, iniciou-se a avaliação do afundamento de trilha de roda e deflexões após a aplicação de cargas pelo simulador de tráfego. Foram aplicados 50 mil ciclos, com um carregamento de 6,5 toneladas, aplicados por um eixo simples de rodas duplas na Pista F trilha bento, conforme visualiza-se na Figura 141. A finalização dos ensaios de carga repetida ocorreu no mês de abril de 2024, para a trilha avaliada.

A área de avaliação, consistia em uma pista de 7m de extensão com uma faixa de 1,15m, sendo a mesma dividida em 7 seções de leitura e 1 seção correspondente ao sensor instalado para o projeto. Além da leitura de ATR, realizou-se a avaliação das deflexões D0 (posição abaixo do carregamento) em cada uma das seções ao longo dos ciclos aplicados.

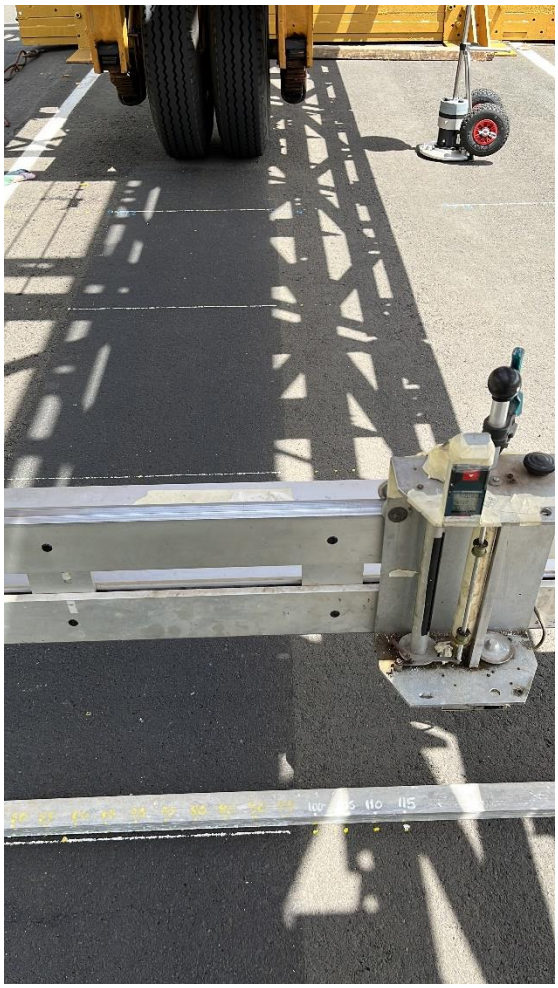
Figura 141: Aplicação de Carga Simulador de Tráfego - Pista F



4.5.1.6.1 Afundamento de trilha de roda e deflexões

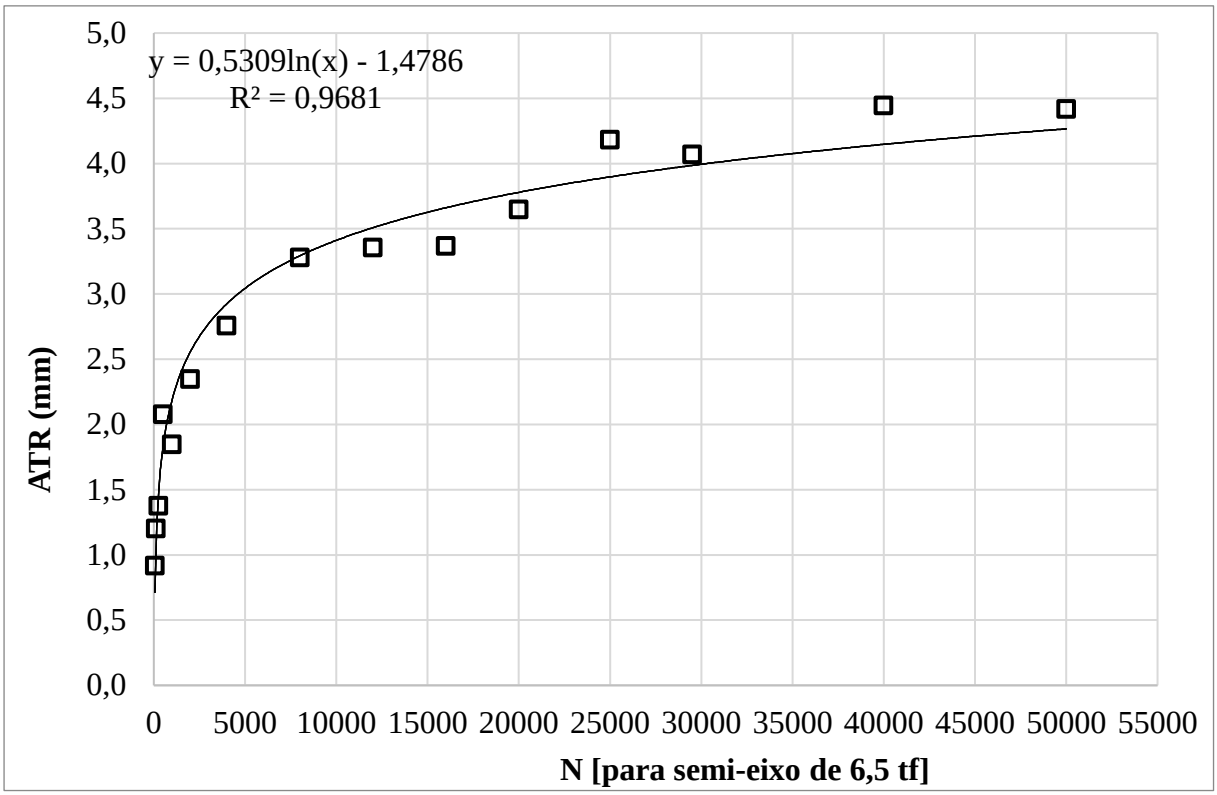
O afundamento de trilha de roda (ATR) foi monitorado por meio de leituras periódicas, com o objetivo de desenvolver um gráfico em escala logarítmica que demonstrasse a evolução do ATR e, consequentemente, o comportamento da pista e do material. Além das medições de afundamento, foram registradas a ocorrência de precipitação e a temperatura. A Figura 142 apresenta como foram realizadas as leituras de afundamento com o perfilógrafo a cada 5cm, nas seções de leitura.

Figura 142: Perfilógrafo leituras ATR



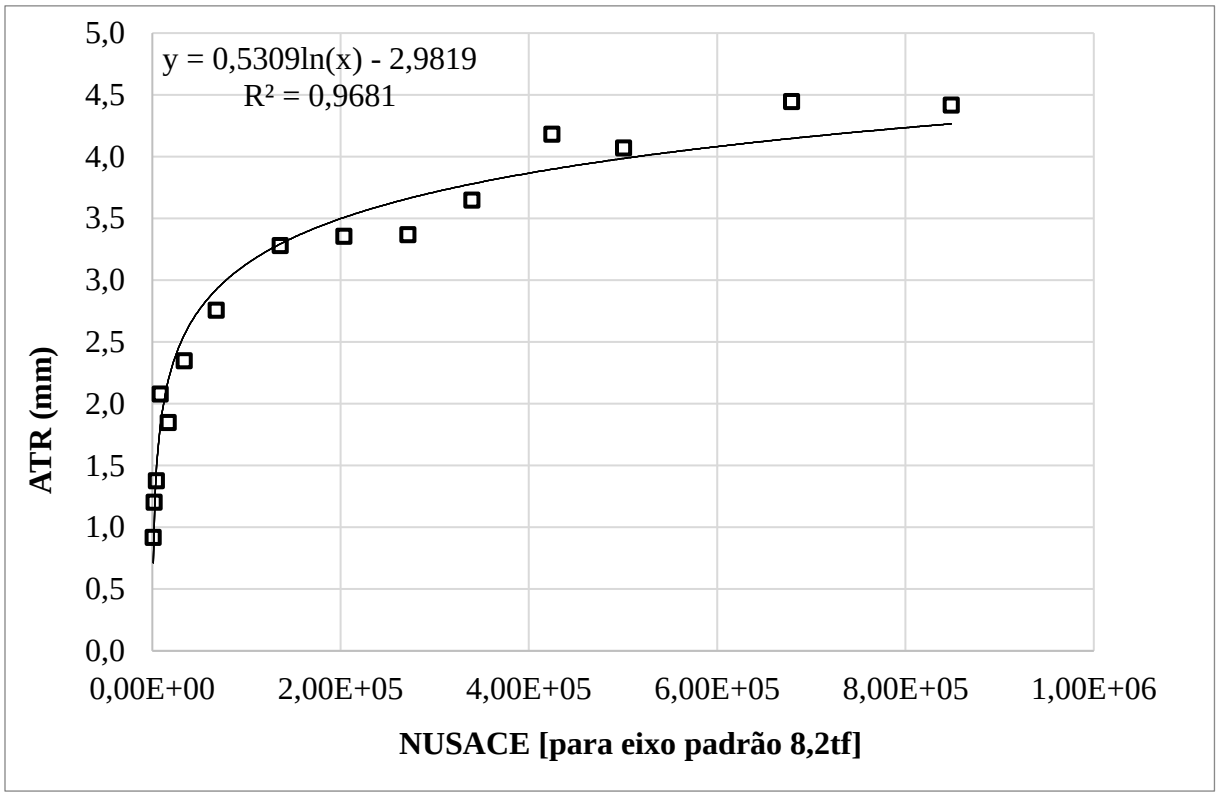
A Figura 143 apresenta o afundamento médio para todas as seções avaliadas, o qual foi de aproximadamente 4,5 mm. Observa-se que o valor de N representado no eixo das abscissas não corresponde ao número N usualmente considerado em projetos, mas sim ao número de ciclos impostos pelo simulador de tráfego.

Figura 143: Evolução do ATR - Pista F trilha Bento



A **Figura** 144 apresenta a evolução do afundamento de trilha de roda, considerando a conversão para um eixo padrão de 8,2 tf USACE. Ao calcular o fator de equivalência, o semi-eixo é 16,97 mais destrutivo que o eixo padrão. A utilização de um carregamento de 6,5tf por semi-eixo deve-se ao ensaio ser acelerado.

Figura 144: Evolução do ATR - Pista F trilha Bento – conversão para eixo padrão



A Figura 145 apresenta as deflexões D0 médias, obtidas ao longo dos 50 mil ciclos do ensaio para o semi-eixo de ensaio com 6,5tf. A

Figura 146 apresenta as deflexões após a conversão do número de ciclos para um eixo padrão USACE de 8,2tf. Observa-se que há uma grande oscilação nas leituras de deflexão ao longo dos ciclos. Estas oscilações, no entanto, podem ter ocorrido de fatores como acomodação das camadas, bem como a temperatura no momento do ensaio. Constata-se também que elas seguiram a mesma tendência ao longo dos ciclos, sendo nos últimos ciclos que ocorrem as maiores variações.

Figura 145: Evolução das deflexões D0 Pista F trilha Bento

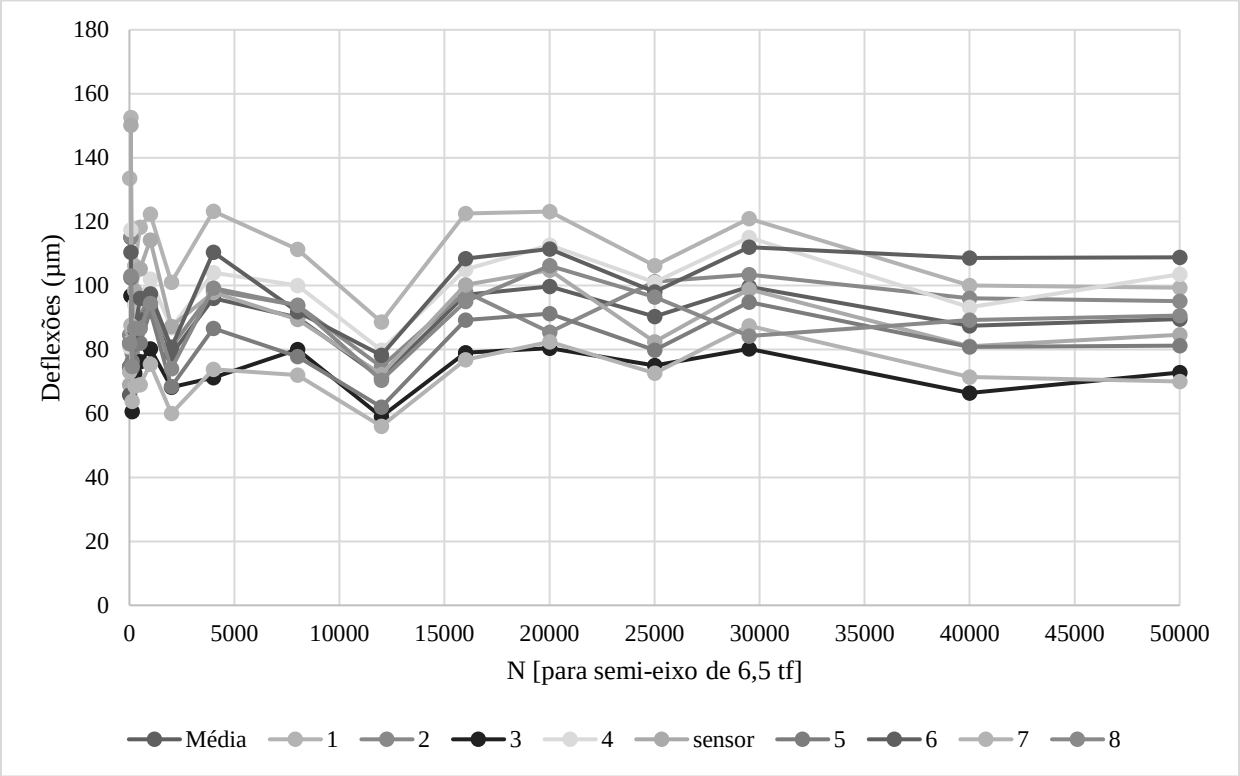
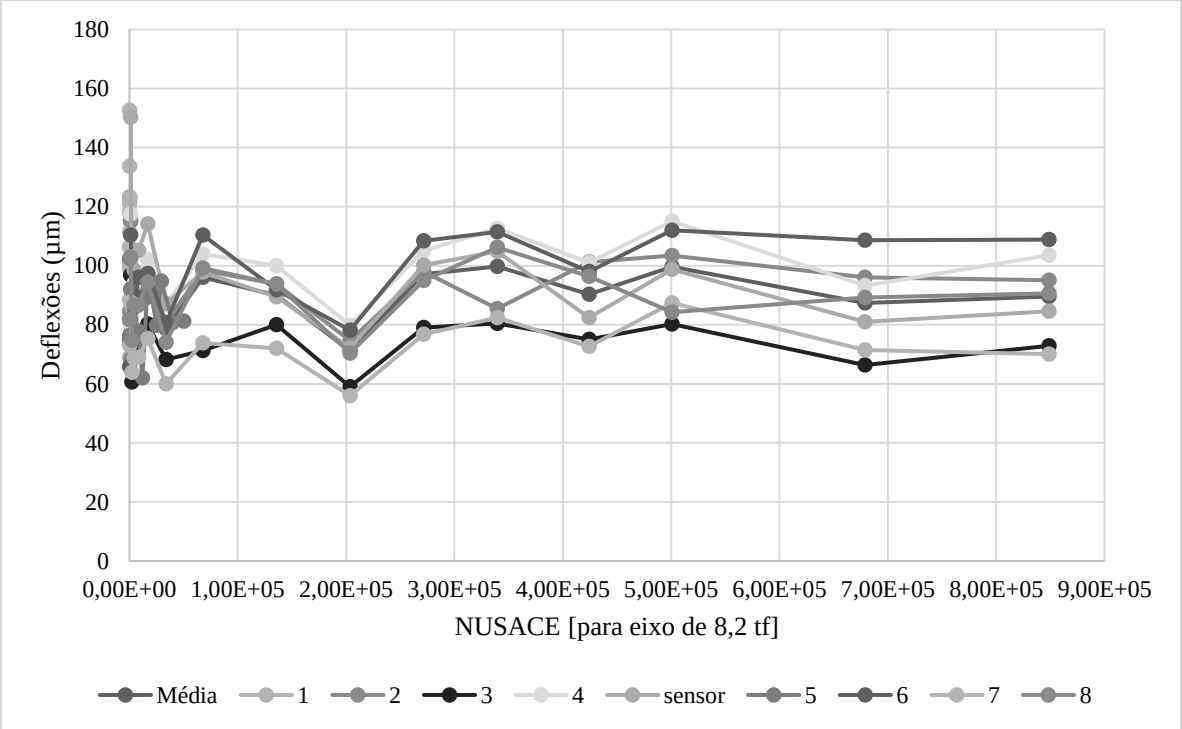


Figura 146: Evolução das deflexões D0 pista F trilha bento eixo padrão 8,2tf



A Figura 147 e Figura 148 apresentam a evolução visual do afundamento de trilha de rodas na pista F trilha Bento. Observa-se que os ensaios foram realizados ao longo de vários meses, durante os quais a pista foi sujeita à ação da chuva e da temperatura. Observa-se que buscou-se realizar a aplicação dos ciclos de carregamento em condições de tempo seco, evitando-se a realização de testes sob chuva ou com água acumulada sobre a pista.

Figura 147: Evolução dos ensaios Pista F trilha bento



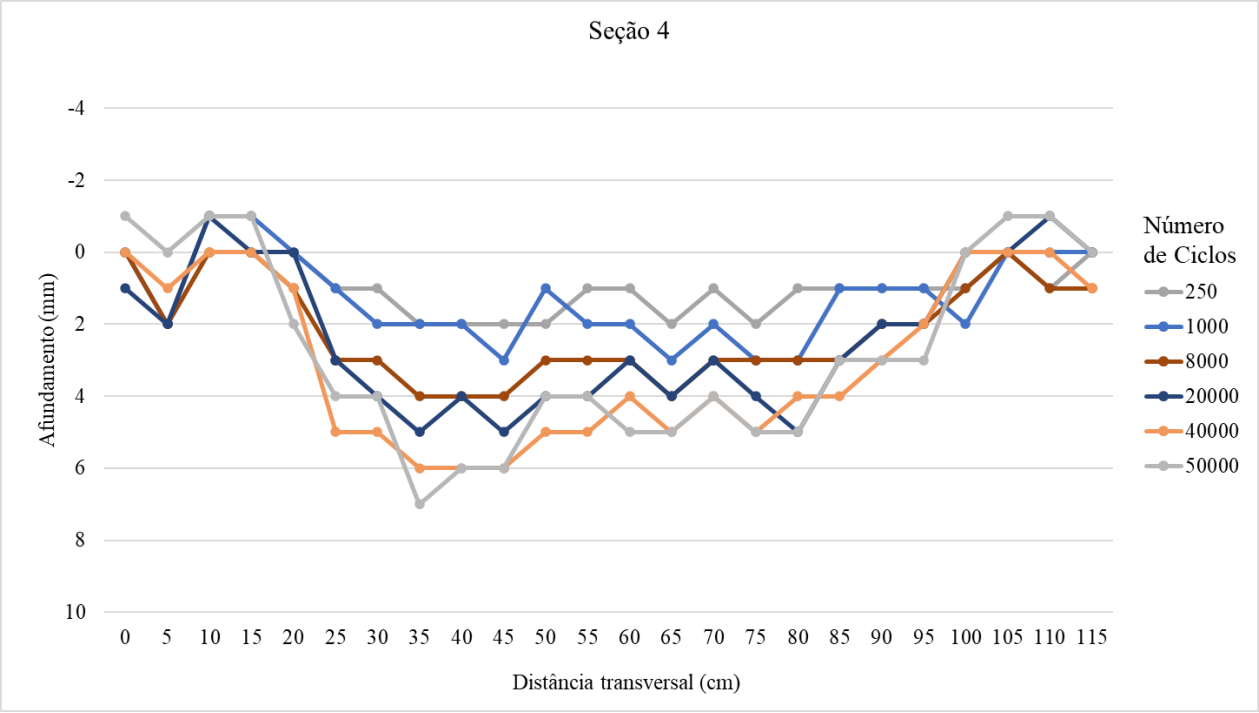
Figura 148: Evolução dos ensaios Pista F trilha bento – continuação



Ao plotar os dados de uma seção avaliada, Figura 149, é possível observar a evolução do afundamento ao longo da seção transversal da trilha de roda durante 50 mil ciclos. Nota-se que os maiores afundamentos se concentram entre as distâncias de aproximadamente 20 cm a 80 cm, região que coincide com o centro da trilha, devido à concentração de cargas.

Adicionalmente, os valores de afundamento aumentam gradativamente com o número de ciclos aplicados, sendo mais pronunciados nos estágios iniciais (até 8 mil ciclos), enquanto a evolução se estabiliza nos ciclos subsequentes. No entanto, mesmo nos ciclos finais, os valores de afundamento permanecem relativamente baixos, o que indica um bom desempenho do material frente à aplicação de cargas cíclicas.

Figura 149: Evolução do ATR seção 4 pista F trilha Bento



4.5.2 ANÁLISE DE DADOS

Na presente seção apresentam-se os dados de análise de dados. Ressalta-se que esta etapa foi iniciada no relatório parcial dois e será finalizada no relatório final, conforme o cronograma físico-financeiro. A seguir apresentam-se os itens de análise de dados concluídos no período.

4.5.2.1 Retroanálise da situação de campo para os quatro trechos em avaliação, com uso da ferramenta BAKFAA ou BackAnalysis da AASHTO, ou BackMeDiNa

Realizou-se as avalições dos quatro trechos experimentais utilizando o software BackMeDiNa. A coleta de dados foi realizada a cada três meses, onde além de se avaliar a condição da pista, buscou-se verificar a sazonalidade dos levantamentos. Devido a coleta de dados ter sido realizada com múltiplas cargas, uma ampla gama de dados foi gerada para cada trecho.

As campanhas de FWD (*Falling weight deflectometer*) ocorreram nos meses de junho de 2023, outubro de 2023, janeiro de 2024 e abril de 2024.

As campanhas ocorreram com a aplicação de múltiplas cargas, conforme a Tabela 8. As campanhas foram realizadas por uma empresa terceirizada contratada pela ECOSUL, nos meses citados. Os trechos monitorados e que foram retroanálisados são:

- BR-392/RS km 174+300 ao km 175+000, com execução em 2011;

- BR-116/RS km 417+400 ao km 417+600, com execução em 2015;

- BR-116/RS km 506+00 ao km 507+ 000, com execução em 2019;

- BR-116/RS km 495+360 ao km 495+540, com execução em janeiro de 2023.

A execução desta campanha de FWD ocorreu de maneira especial para o acompanhamento das pistas. A execução foi realizada ao longo de todo o trecho experimental, com múltiplas cargas e leituras a cada 20 metros.

Para a avaliação por meio de retroanálise dos trechos construídos anteriormente ao RDT, seguiu-se os parâmetros e dimensões já avaliados por (Dias *et al.*, 2023), sendo possível assim verificar a evolução dos trechos. Já para o trecho experimental construído durante o RDT, utilizou-se as dimensões avaliadas na sondagem realiza.

Retroanálises BR-116/RS km 417+400 ao km 417+600

O trecho de pavimento analisado foi construído em 2015, utilizando uma camada de base estabilizada com emulsão, sem a incorporação de Reclaimed Asphalt Pavement (RAP). Mesmo após anos de tráfego contínuo, o segmento apresenta-se estruturalmente íntegro, com apenas

pequenos afundamentos localizados nas trilhas de roda. Não há evidências de intervenções significativas, como troca de revestimento ou reparos superficiais, que possam ter alterado suas condições originais. A Tabela 19 e Tabela 20 apresentam os resultados históricos das retroanálises realizadas por Dias et al.(2023).

Tabela 19: Resultados Históricos de retroanálises BR 116/RS km 417 – Pista Sul

Camada	Espessura (mm)	Pista Sul				
		Ano				
		2015	2018	2019	2020	2021
Novo Concreto Asfáltico	60	-	4233	7500	7000	8500
Base Estabilizada	120	-	1250	1441	696	1100
Concreto Asfáltico Velho	300	6842	2395	5750	1659	4675
Base de Solo	400	348	56	209	206	117
Subleito	-	203	222	269	286	432

Fonte: Dias et. al (2023)

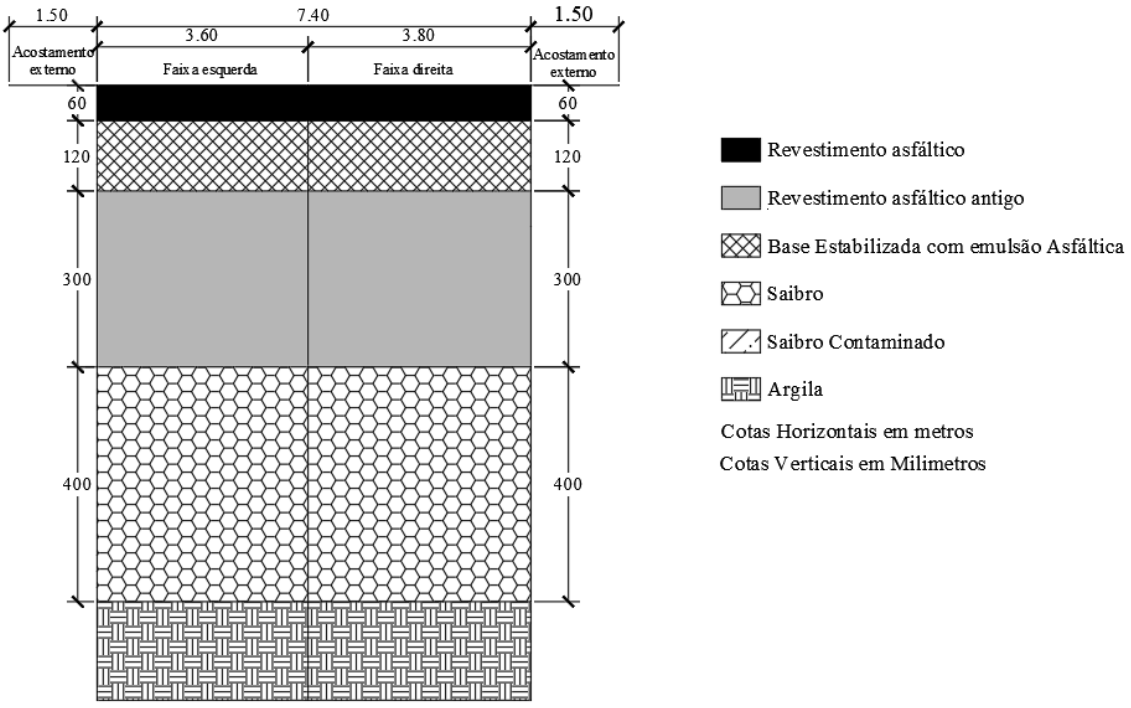
Tabela 20: Resultados Históricos BR 116/RS km 147 Pista Norte

Camada	Espessura (mm)	Pista Norte				
		Ano				
		2015	2018	2019	2020	2021
Novo Concreto Asfáltico	60	-	5000	-	7667	8667
Base Estabilizada	120	-	644	-	817	990
Concreto Asfáltico Velho	300	1762	990	-	1140	5914
Base de Solo	400	295	47	-	72	169
Subleito	-	178	650	-	514	376

Fonte: Dias et. al (2023)

Por ser um trecho de pista simples, as faixas sentido norte e sul foram levantadas com o FWD a cada 20m. A Figura 150 apresenta as espessuras das camadas utilizadas para as avalições de retroanálises.

Figura 150: Camadas do pavimento - BR 116/RS km 417



A Tabela 21 apresenta as médias dos Módulos Retroanálisados para as camadas que compõem o pavimento conforme esquema da Figura 150. A tabela apresenta somente os dados de retroanálises correspondentes a carga de 40kN, que é comumente utilizada em campanhas de levantamento de FWD.

Variação dos Módulos nas Camadas:

- Novo Concreto Asfáltico (60 mm): Os valores de módulo diminuíram significativamente em janeiro de 2024, atingindo 2.197 MPa, comparado a valores superiores a 5.500 MPa nos meses anteriores. Essa redução pode ser atribuída a condições ambientais adversas, como altas temperaturas, que afetam a rigidez do material.
- Base Estabilizada (120 mm): Apresentou comportamento semelhante, com os módulos reduzidos para 880 MPa em janeiro de 2024, contravalores acima de 2.600 MPa nos outros meses. Apesar disso, recuperou-se para 3.846 MPa em abril de 2024, indicando uma possível reversibilidade das condições adversas.

- Concreto Asfáltico Velho (300 mm): Registrou variações menos acentuadas, com módulos variando de 2.066 MPa a 4.345 MPa. Essa camada, mais profunda, parece menos sensível às condições climáticas de superfície.
- Base de Solo e subleito: Os valores dos módulos dessas camadas mantiveram-se baixos ao longo do período, com pequenas variações, o que é esperado devido à sua função estrutural secundária.

Há uma redução generalizada dos módulos em janeiro de 2024 para todas as camadas, reforçando a hipótese de que fatores climáticos, como a elevação da temperatura do pavimento, influenciam negativamente a rigidez do material.

Tabela 21: Média de Módulos Retroanálisados BR-116/RS km 417 pista Sul

Camada	Espessura (mm)	Pista Sul			
		Ano			
		jun/23	out/23	jan/24	abr/24
Novo Concreto Asfáltico	60	5615	5589	2197	4035
Base Estabilizada	120	2690	2946	880	3846
Concreto Asfáltico Velho	300	4345	3817	2095	2066
Base de Solo	400	58	52	54	216
subleito	-	446	489	509	263

Pode-se observar na Tabela 21, que há uma variação dos valores de módulos nas camadas ao longo do ano, destacando-se que o mês de janeiro de 2024 apresentou uma redução dos módulos para todas as camadas analisadas, frente aos demais meses analisados no período.

Na camada de Novo Concreto Asfáltico, com espessura de 60 mm, os módulos registrados na Tabela 19, referentes ao período de 2019 a 2021, variaram entre 7.000 MPa e 8.500 MPa, indicando uma rigidez estrutural elevada e consistente durante esses anos. Contudo, na Tabela 21, que apresenta os dados mais recentes de 2023 e início de 2024, os módulos sofreram uma redução significativa, oscilando entre 2.197 MPa e 5.615 MPa. Essa queda acentuada, especialmente em janeiro de 2024, pode ser atribuída ao envelhecimento do material, à ação contínua do tráfego e à

influência das condições climáticas, como temperaturas mais elevadas que reduzem a rigidez da camada.

A Base Estabilizada, com espessura de 120 mm, apresenta um comportamento distinto. Na Tabela 19, os módulos históricos variaram de 696 MPa a 1.441 MPa entre 2019 e 2021, refletindo um desempenho estrutural moderado para esta camada. Já na Tabela 21, os valores de 2023 e 2024 mostram uma melhoria significativa, com módulos médios entre 880 MPa e 3.846 MPa. Este aumento sugere que a Base Estabilizada manteve sua funcionalidade estrutural ao longo do tempo, possivelmente beneficiada pela menor exposição direta às condições ambientais extremas. No entanto, observa-se uma redução pontual em janeiro de 2024, com os módulos caindo para 880 MPa, reforçando a influência sazonal das altas temperaturas.

A camada de Concreto Asfáltico Velho, com 300 mm de espessura, também apresentou mudanças perceptíveis. Na Tabela 19, os módulos históricos variaram de 1.659 MPa a 5.750 MPa, mostrando uma tendência de redução ao longo dos anos avaliados. Na Tabela 21 , os valores mais recentes situaram-se entre 2.066 MPa e 4.345 MPa, evidenciando uma relativa estabilidade em comparação aos períodos anteriores, mas ainda com variações sazonais influenciadas por fatores ambientais.

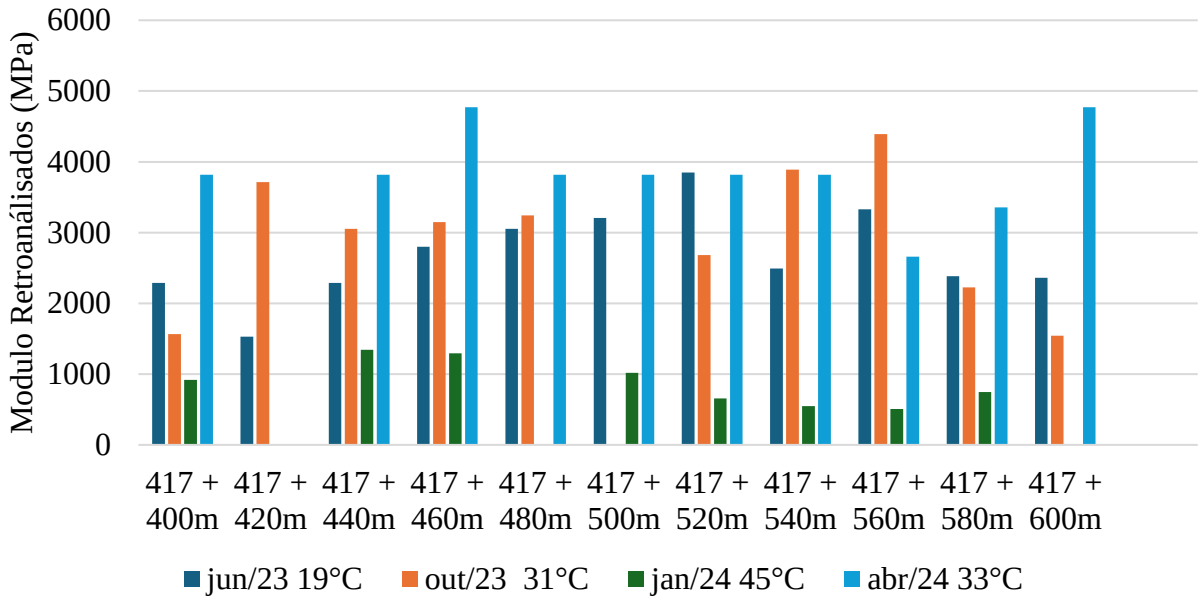
As camadas inferiores, como a Base de Solo e a Subleito, mantiveram módulos consistentemente baixos em ambas as tabelas, com pequenas variações ao longo do tempo. Esses resultados indicam que as camadas mais profundas são menos afetadas pelas condições climáticas e pelo tráfego, desempenhando sua função estrutural de suporte com relativa constância.

De forma geral, a comparação entre os dados históricos da Tabela 19 e os resultados mais recentes da Tabela 21 revela um declínio nos módulos das camadas superiores, particularmente no Novo Concreto Asfáltico, refletindo o impacto do tempo, do tráfego acumulado e das condições ambientais. Por outro lado, a Base Estabilizada mostrou uma melhoria no desempenho estrutural, destacando sua resiliência. Essa análise ressalta a importância do monitoramento contínuo para entender a evolução das condições do pavimento e para planejar intervenções de manutenção adequadas.

A Figura 151 ilustra a variação do módulo de resiliência retroanálisados para a Base Estabilizada, considerando a carga de 40 kN, ao longo da extensão da pista sul. A Base Estabilizada apresenta uma variação significativa dos módulos ao longo do trecho, com os menores valores concentrados em janeiro de 2024. A distribuição dos módulos ao longo do trecho sugere uma influência combinada de fatores climáticos e de tráfego. Os menores em janeiro reforçam a relação direta

entre a temperatura do pavimento e a perda de rigidez, destacando a necessidade de considerar a sazonalidade em análises de desempenho. Apresenta os dados de módulo de resiliência retroanálisados para a carga de 40kN a cada 20m na pista sul. Consegue-se observar que o mês de janeiro apresenta os menores módulos, possivelmente devido à temperatura do pavimento, mostrando a influência da mesma no comportamento do material.

Figura 151: Variação do Módulo de Resiliência retroanálisados Base estabilizada - 40kN BR-116/RS - Crescente



A Tabela 22 apresenta dados semelhantes aos da Tabela 21, mas refere-se à pista norte do mesmo trecho. A pista norte apresenta módulos geralmente superiores aos da pista sul para camadas como o Novo Concreto Asfáltico e a Base Estabilizada, o que pode indicar diferenças no nível de tráfego ou nas condições de exposição ambiental.

Assim como na pista sul, os módulos apresentam redução significativa em janeiro de 2024, destacando-se o Novo Concreto Asfáltico, que passou de 8.667 MPa em outubro de 2023 para 2.000 MPa em janeiro de 2024.

As camadas mais profundas (Base de Solo e Subleito) apresentam menores variações ao longo do tempo, indicando que a influência climática afeta mais as camadas superiores.

Tabela 22: Média de Módulos Retroanalisádos BR 116/RS km 417 pista Norte

Camada	Espessura (mm)	Pista Norte			
		Ano			
		Jun/23	Out/23	Jan/24	Abr/24
Novo Concreto Asfáltico	60	5464	5976	4543	7067
Base Estabilizada	120	4944	3183	786	5941
Concreto Asfáltico Velho	300	1652	2456	735	1872
Base de Solo	400	128	152	159	48
Subleito	-	287	1440	277	350

A Figura 152 apresenta a variação dos módulos de resiliência retroanálisados da Base Estabilizada na pista norte do km 417 da BR-116/RS, considerando uma carga padrão de 40 kN. Essa análise fornece informações detalhadas sobre o comportamento estrutural da camada ao longo do trecho avaliado e em diferentes períodos.

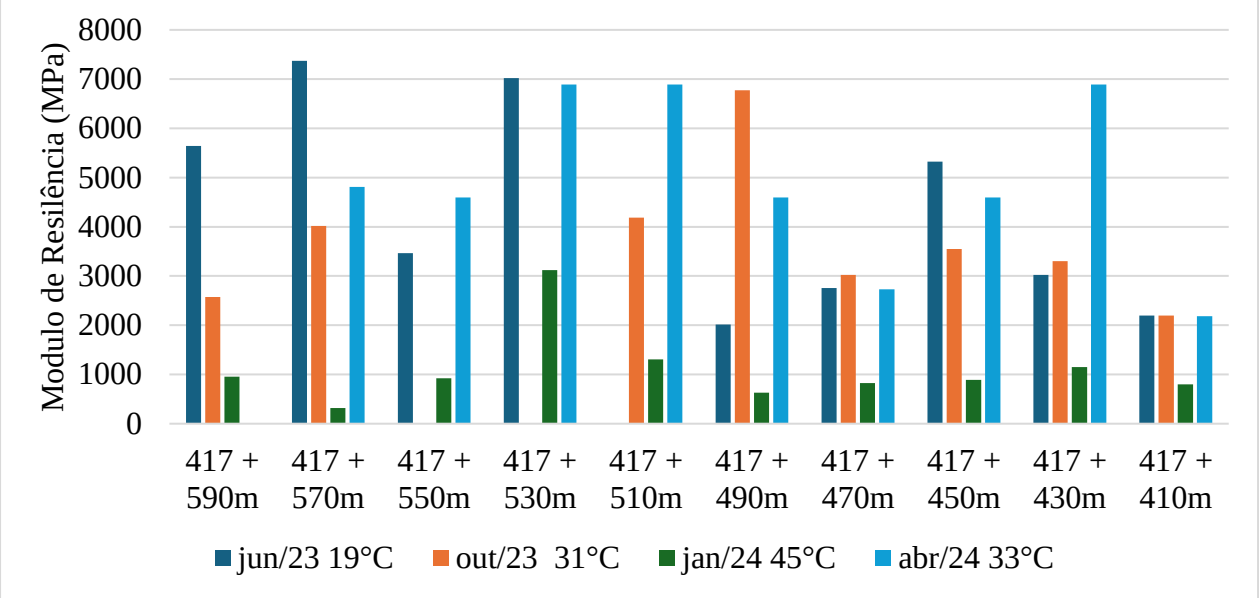
A figura evidencia uma variação significativa dos módulos ao longo da extensão do pavimento. Nos meses analisados, observa-se uma tendência de maior uniformidade nos valores em meses como junho e outubro de 2023, enquanto em janeiro de 2024, os módulos apresentam uma redução expressiva e maior dispersão. Esses resultados são indicativos de que as condições climáticas, especialmente a temperatura do pavimento, têm uma influência direta sobre o desempenho da Base Estabilizada. O período de janeiro, marcado por temperaturas mais elevadas, apresenta os menores valores de módulo, reforçando a relação inversa entre a rigidez do material e a temperatura.

Além disso, a distribuição dos valores ao longo do trecho sugere a presença de variações localizadas, que podem estar associadas a diferenças nas condições de compactação, níveis de umidade, interação com camadas adjacentes ou cargas de tráfego específicas. Esses fatores podem criar zonas com menor rigidez estrutural, que são mais sensíveis às condições climáticas e ao tráfego.

De maneira geral, a Figura 152 destaca a importância de monitorar a Base Estabilizada em diferentes períodos e condições ambientais. A redução dos módulos em janeiro de 2024 pode ser

temporária, refletindo as condições sazonais, mas aponta para a necessidade de atenção em trechos com menor rigidez para evitar a progressão de danos estruturais. A análise reforça a relevância de considerar as variações sazonais no planejamento de manutenções e reabilitações do pavimento.

Figura 152: Variação do Módulo de Resiliência retroanálisados Base estabilizada - 40kN BR-116/RS - decrescente



A comparação entre a Tabela 20, que apresenta os resultados históricos das retroanálises da pista norte no km 417 da BR-116/RS entre 2015 e 2021, e a Tabela 22, com os dados mais recentes de 2023 e 2024, revela mudanças significativas nas condições estruturais das camadas do pavimento ao longo do tempo.

Na camada de Novo Concreto Asfáltico, com espessura de 60 mm, os módulos registrados na Tabela 20 para o período histórico variaram de 5.000 MPa a 8.667 MPa, demonstrando alta rigidez estrutural. Entretanto, na Tabela 22, que traz os valores médios de 2023 e 2024, observa-se uma redução significativa, com os módulos variando de 2.000 MPa em janeiro de 2024 a 6.334 MPa em junho de 2023. Essa diminuição, particularmente acentuada em janeiro, pode ser atribuída ao envelhecimento do material e às condições ambientais adversas, como altas temperaturas, que afetam a rigidez das camadas superficiais.

A Base Estabilizada, com espessura de 120 mm, apresenta um desempenho estrutural moderado nos dados históricos da Tabela 20, com módulos variando de 644 MPa a 990 MPa. Na Tabela 22, os valores de 2023 e 2024 mostram um aumento significativo, com módulos entre 500 MPa e 2.700 MPa. Essa melhoria pode indicar que a camada tem se mantido estável e funcional ao longo do tempo, embora também tenha registrado uma redução em janeiro de 2024, provavelmente devido a fatores climáticos, como temperaturas elevadas que afetam temporariamente a rigidez do material.

Para a camada de Concreto Asfáltico Velho, com 300 mm de espessura, os módulos históricos na Tabela 20 oscilaram entre 990 MPa e 5.914 MPa. Na Tabela 22, os valores recentes variaram entre 2.000 MPa e 5.500 MPa. A camada manteve uma relativa estabilidade ao longo do tempo, com variações menos pronunciadas do que as observadas nas camadas superiores. Isso pode ser explicado pela maior profundidade da camada, que a protege das condições ambientais diretas.

As camadas inferiores, como a Base de Solo e a Subleito, apresentaram valores consistentemente baixos em ambas as tabelas. Na Tabela 20, os módulos da Base de Solo variaram de 47 MPa a 295 MPa, enquanto na Tabela 22 eles permaneceram entre 50 MPa e 200 MPa. Da mesma forma, a Subleito manteve valores entre 178 MPa e 650 MPa na Tabela 20, enquanto os dados mais recentes da Tabela 22 indicam módulos entre 400 MPa e 600 MPa. Essas camadas demonstram menor sensibilidade às condições ambientais e de tráfego, desempenhando suas funções estruturais de suporte com estabilidade.

De maneira geral, a comparação entre as Tabela 20 e Tabela 22 evidencia uma redução significativa na rigidez das camadas superiores, especialmente do Novo Concreto Asfáltico, ao longo do tempo, reflexo do envelhecimento natural dos materiais e do impacto das condições ambientais. Por outro lado, a Base Estabilizada apresentou um desempenho estrutural mais robusto nos dados mais recentes, destacando-se pela estabilidade em relação ao período histórico. As camadas inferiores, como esperado, mostraram menor variação, indicando que suas propriedades permanecem praticamente inalteradas. Esses resultados reforçam a necessidade de monitoramento contínuo para ajustar estratégias de manutenção, considerando tanto a degradação estrutural quanto os efeitos sazonais sobre o pavimento.

Retroanálises BR 116/RS km 506+00 ao km 507+ 000 com execução em 2019

O trecho em questão foi construído em 2019, utilizando uma camada de base estabilizada com emulsão e RAP, denominada no presente trabalho como BSM. O trecho mesmo após anos de tráfego apresenta-se íntegro, com pequenos afundamentos de trilha de roda localizados. Na última visita ao trecho, conforme retratado nos levantamentos visuais, houve a manutenção do pavimento em pontos localizados para a redução do afundamento de trilha de roda. A Tabela 23 a presenta os resultados históricos de módulos de resiliência retroanalisados para o km 506 da BR-116/RS, referentes aos anos de 2019, 2020 e 2021 desenvolvidos por Dias et al.(2023). Os dados indicam que, ao longo dos três anos, houve variações nos módulos das diferentes camadas do pavimento. A camada de BSM (130 mm), que contém RAP, apresentou uma evolução significativa nos módulos, passando de 460 MPa em 2020 para 985 MPa em 2021, o que demonstra a eficiência estrutural do material estabilizado com emulsão ao longo do tempo.

Tabela 23: Resultados de Módulos de resiliência Históricos BR 116/RS km 506

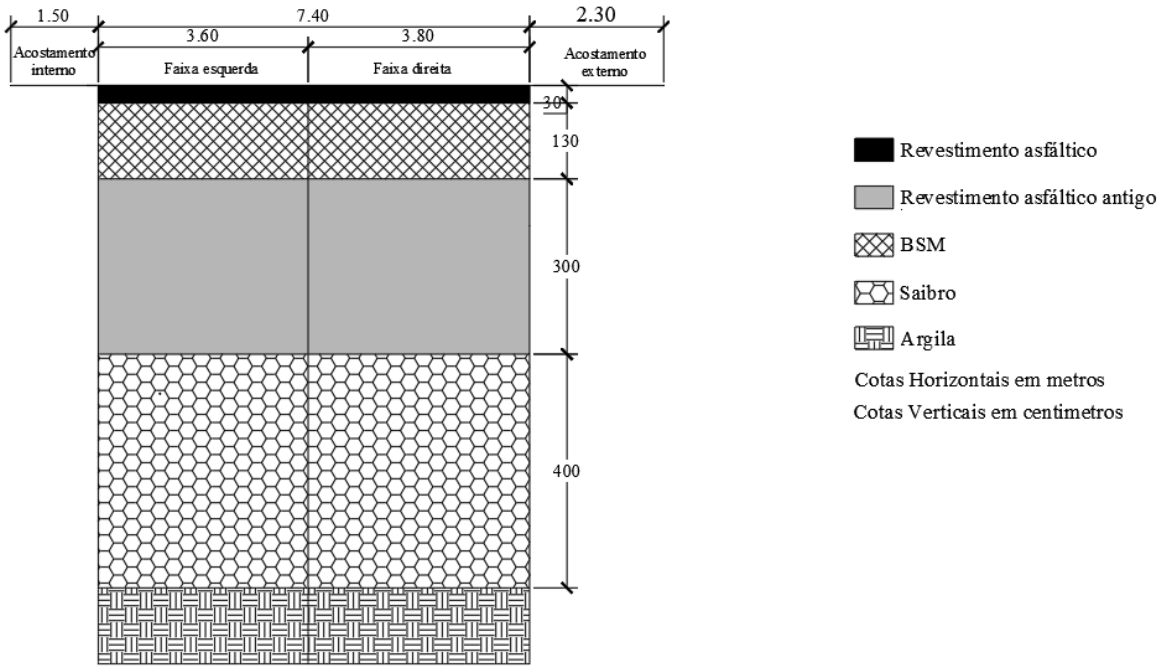
Camada	Espessura (mm)	Pista Sul		
		Ano		
		2019	2020	201
Novo Concreto Asfáltico	30	-	3112	4252
BSM	130	-	460	985
Concreto Asfáltico Velho	300	703	403	1512
Base de Solo	400	80	111	90
Subleito	0	169	245	254

Fonte: Dias et. al (2023)

A avaliação do trecho, ocorreu a cada 20m, na pista sul. Ressalta-se que o trecho atualmente está duplicado, assim o trecho avaliado corresponde a faixa pesada da rodovia. A Figura 153 apresenta a estrutura do pavimento da BR-116/RS no km 506, evidenciando as camadas que compõem o trecho e suas respectivas espessuras. A camada de BSM (130 mm), que é o foco principal deste estudo, encontra-se entre o Novo Concreto Asfáltico (30 mm) e o Concreto Asfáltico Velho (300 mm), sobrepondo-se às camadas de Base de Solo e Subleito.

A análise da Figura 153 em conjunto com os dados da Tabela 23 e Tabela 24 destaca a importância da BSM na estrutura do pavimento. Sua posição intermediária e sua função de distribuição de tensões são refletidas nos valores dos módulos, que mostram um desempenho superior em relação às camadas inferiores e variam de acordo com as condições ambientais e de tráfego. A interação entre as camadas também influencia o comportamento geral do pavimento, evidenciando a necessidade de monitoramento contínuo para garantir sua integridade estrutural.

Figura 153: Estrutura do pavimento - BR 116/RS km 506



A Tabela 24 apresenta os valores médios dos módulos de resiliência retroanalisados para as camadas do pavimento no km 506 da BR-116/RS, considerando diferentes períodos de 2023 e 2024. Os resultados refletem variações ao longo dos meses analisados, destacando o impacto das condições ambientais e sazonais sobre a rigidez das camadas.

Na camada de Novo Concreto Asfáltico, com espessura de 30 mm, os módulos variaram de 2.861 MPa em janeiro de 2024, o menor valor registrado, a 4.913 MPa em outubro de 2023, que representou o pico de rigidez no período. Essa camada mostrou uma redução significativa nos meses de temperaturas mais elevadas, como janeiro, indicando a sensibilidade do material às condições térmicas, que afetam a rigidez do revestimento.

A camada de BSM, com 130 mm de espessura, apresentou valores de módulo entre 994 MPa em abril de 2024 e 1.926 MPa em outubro de 2023. Essa variação destaca o comportamento resiliente da camada estabilizada, que demonstrou uma capacidade estrutural superior em períodos de temperaturas mais amenas. Entretanto, a redução para 1.072 MPa em janeiro de 2024 evidencia que a camada também é afetada por variações térmicas, embora de forma menos pronunciada que o Novo Concreto Asfáltico.

Na camada de Concreto Asfáltico Velho, com 300 mm de espessura, os módulos foram os mais baixos registrados, variando de 197 MPa em abril de 2024 a 499 MPa em outubro de 2023. Esse comportamento reflete o estado envelhecido da camada, que contribui menos para a capacidade estrutural do pavimento, mas ainda desempenha um papel complementar ao suporte da BSM.

As camadas inferiores, Base de Solo (400 mm) e subleito (sem espessura definida), apresentaram módulos relativamente estáveis ao longo do período. A Base de Solo registrou um aumento expressivo em abril de 2024, com um módulo de 821 MPa, enquanto os valores nos demais meses variaram entre 91 MPa e 324 MPa. Esse aumento pode ser atribuído a uma melhor condição de suporte ou compactação sazonal. Já o subleito manteve valores entre 186 MPa e 320 MPa, demonstrando menor influência das condições climáticas e maior consistência no desempenho.

De forma geral, a Tabela 24 evidencia uma redução significativa nos módulos em janeiro de 2024 para todas as camadas, especialmente as superiores, refletindo o impacto das altas temperaturas na rigidez do pavimento. As variações observadas reforçam a necessidade de considerar as condições sazonais e ambientais na análise de desempenho do pavimento e no planejamento de intervenções de manutenção.

Tabela 24: Média de Módulos Retroanalisádos BR 116/RS km 506 Pista Sul

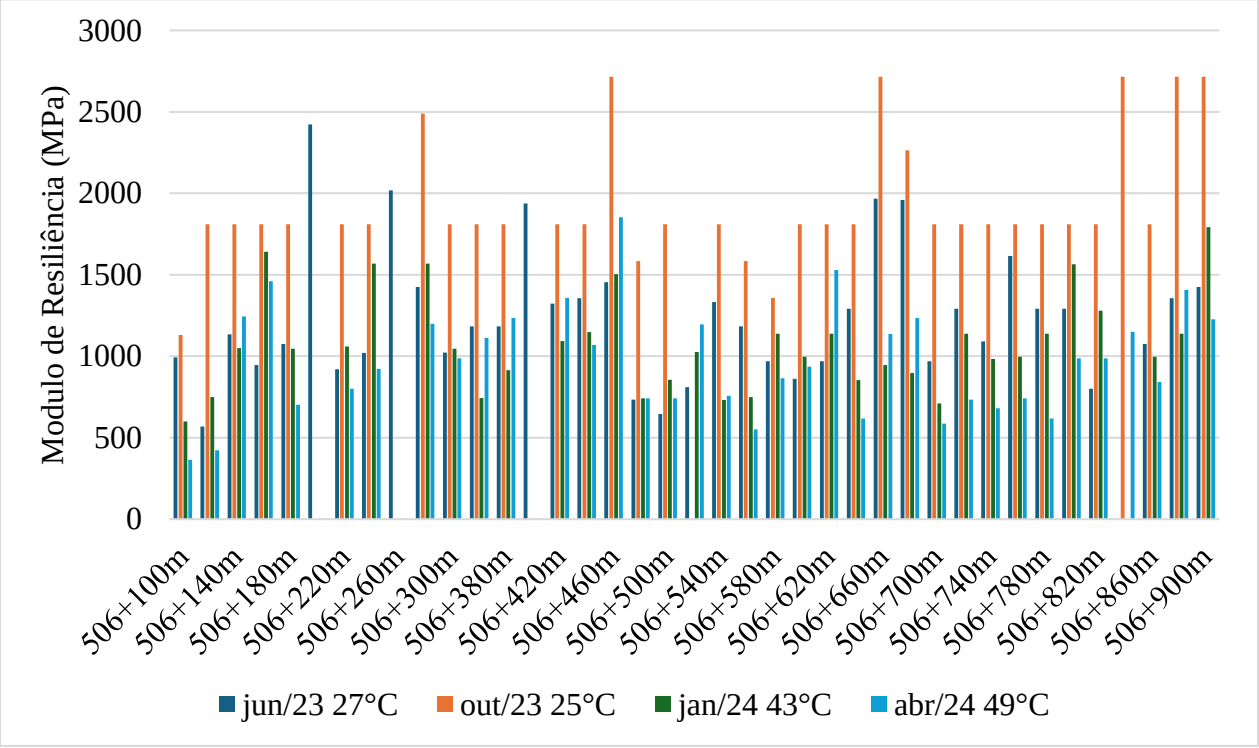
Camada	Espessura (mm)	Pista Sul			
		Ano			
		Jun/23	Out/23	Jan/24	Abr/24
Novo Concreto Asfáltico	30	4398	4913	2861	3904
BSM	130	1234	1926	1072	994
Concreto Asfáltico Velho	300	305	499	265	197
Base de Solo	400	310	91	324	821
Subleito	0	191	320	200	186

A Figura 154 apresenta a variação dos módulos de resiliência retroanálisados da camada de BSM ao longo do trecho avaliado. Os dados revelam que, mesmo após a exclusão dos extremos do segmento e de dados com grande dispersão, ainda há variações significativas nos módulos ao longo da extensão da pista. Destaca-se que os dados com muita variação foram removidos, assim como os primeiros 100 metros e os 100 metros finais, devido à grande variação de dados obtidos nas retroanálises.

Observa-se que os menores valores são registrados no mês de janeiro de 2024, o que está alinhado com as reduções sazonais observadas nas tabelas. Esses resultados reforçam a sensibilidade do material estabilizado às condições climáticas, particularmente às altas temperaturas, que podem reduzir temporariamente a rigidez da camada.

A distribuição dos módulos ao longo do trecho também indica a existência de zonas com desempenho diferenciado, possivelmente relacionadas a fatores como compactação local, condições do subleito ou impactos concentrados do tráfego. De forma geral, a análise dos dados da Figura 154 evidencia a necessidade de manutenção localizada e a importância de considerar as variações sazonais no comportamento da BSM, destacando seu papel crucial na estabilidade do pavimento.

Figura 154: Variação do Módulo de Resiliência retroanálisados BSM - 40kN BR-116/RS km 506



Retroanálises BR-392/RS km 174+300 ao km 175+000

O trecho em análise, localizado no km 174 da BR-392/RS, foi construído em 2011 utilizando uma base estabilizada aberta com emulsão, sem a incorporação de material fresado (RAP). Este é o trecho mais antigo avaliado no presente RDT. Apesar de sua longa vida útil e exposição ao tráfego, o pavimento permanece em boas condições estruturais, sem a ocorrência de intervenções profundas, sendo realizadas apenas manutenções superficiais. Não foram identificados defeitos crônicos durante os levantamentos visuais, e os afundamentos localizados nas trilhas de roda foram classificados como pequenos.

A Tabela 25 apresenta os resultados históricos dos módulos de resiliência obtidos por Dias et al. (2023). Os dados revelam a evolução dos módulos ao longo dos anos para as diferentes camadas do pavimento.

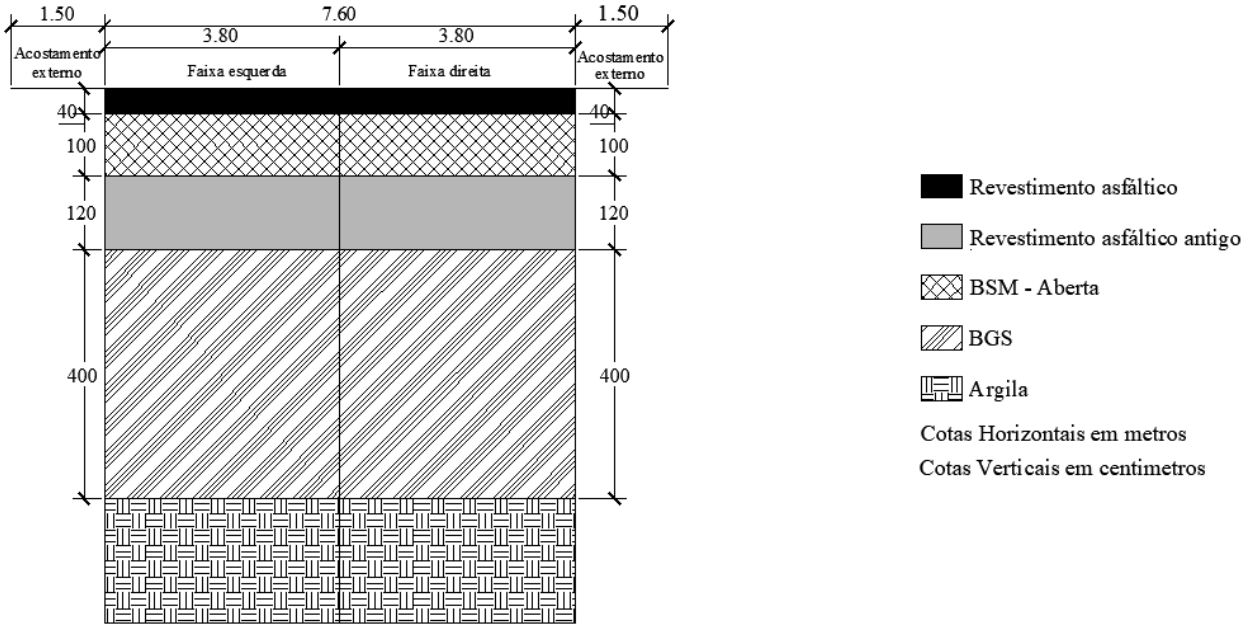
Tabela 25: Resultados de Módulos de resiliência Históricos BR 392/RS km 174

Camada	Espessura (mm)	Pista Norte			
		Ano			
		2018	2019	2020	2021
Novo Concreto Asfáltico	40	4292	3665	4505	4008
Base estabilizada	100	738	618	648	728
Concreto Asfáltico Velho	120	667	1113	1345	1443
Base de Solo	400	199	143	260	176
Subleito	0	416	423	464	487

Fonte: Dias et. al (2023)

A Figura 155 apresenta as camadas do revestimento as quais foram utilizadas para a análise. Observa-se que as duas pistas apresentam as mesmas características.

Figura 155: Estrutura do Pavimento – BR-392/RS km 174



A Tabela 26 fornece os módulos retroanálisados mais recentes, com dados referentes ao ano de 2023 e início de 2024. Esses valores foram obtidos com base na carga padrão de 40 kN e indicam variações significativas em comparação aos históricos:

- Novo Concreto Asfáltico: Os módulos oscilaram entre 4.523 MPa (abril de 2024) e 5.130 MPa (junho de 2023), mantendo valores elevados e estáveis ao longo dos meses analisados. Esse comportamento sugere que a camada de revestimento continua desempenhando sua função de forma eficiente.
- Base Estabilizada: Apresentou um desempenho notável, com módulos variando de 2.444 MPa (janeiro de 2024) a 3.735 MPa (abril de 2024). Esses valores são significativamente superiores aos registrados nos históricos apresentados na Tabela 25, o que pode ser atribuído à evolução das propriedades do material estabilizado ao longo do tempo.
- Concreto Asfáltico Velho: Os módulos retroanálisados mostraram maior variação, com uma redução em janeiro de 2024 (2.304 MPa), seguida de recuperação nos meses subsequentes. Essa oscilação pode estar relacionada às condições ambientais ou à interação com as camadas adjacentes.

- Base de Solo: Os módulos mantiveram-se baixos, mas com variações sazonais, oscilando entre 115 MPa (outubro de 2023) e 363 MPa (janeiro de 2024). Esse comportamento pode ser influenciado pelas condições de umidade e compactação do solo.
- Subleito: Os valores variaram entre 81 MPa (junho de 2023) e 479 MPa (outubro de 2023), demonstrando uma resposta consistente ao longo do período avaliado.

A camada de base estabilizada, em particular, destacou-se por apresentar módulos significativamente superior em comparação aos dados históricos, indicando sua contribuição essencial para a estabilidade do pavimento.

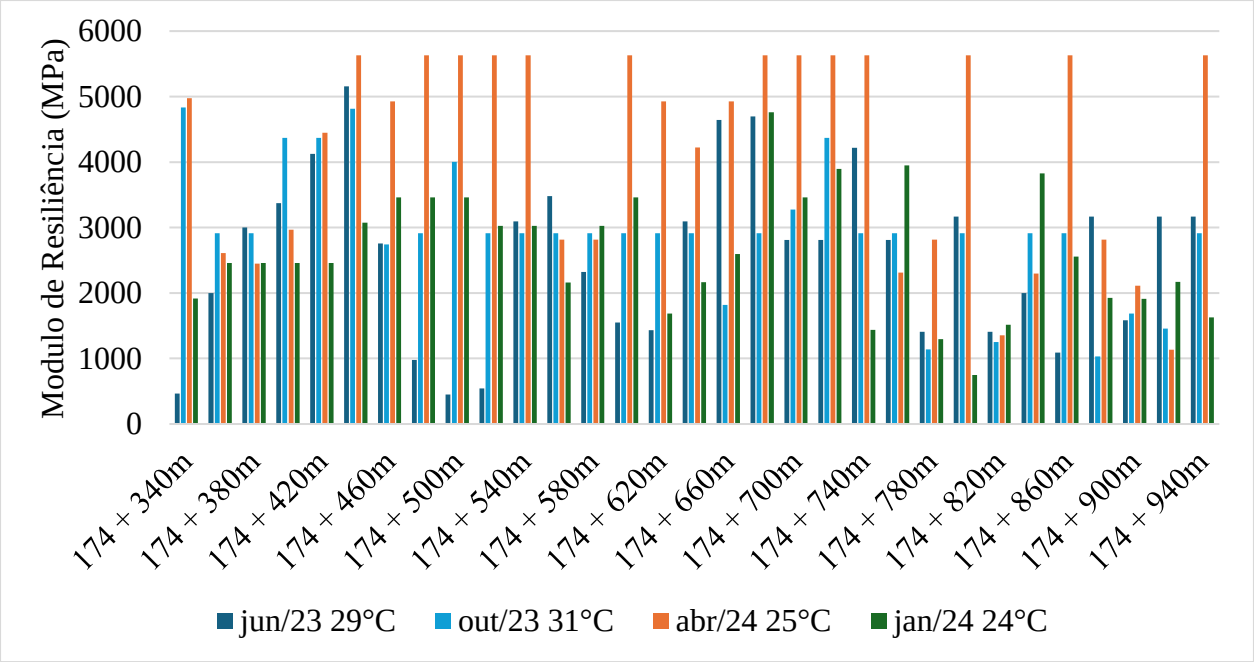
Tabela 26: Média de Módulos Retroanálisados BR 392/RS km 174 Pista norte

Camada	Espessura (mm)	Pista Norte			
		Ano			
		Jun/23	Out/23	Jan/24	Abr/24
Novo Concreto Asfáltico	40	5130	4733	5128	4523
Base estabilizada	100	2499	2724	2444	3735
Concreto Asfáltico Velho	120	3155	3520	2304	3107
Base de Solo	400	256	115	363	148
Subleito	0	81	479	400	462

Na Figura 156 ilustra a variação dos módulos de resiliência retroanálisados da base estabilizada ao longo do trecho avaliado, considerando uma carga padrão de 40 kN. Os dados mostram uma distribuição relativamente homogênea, após a exclusão das estacas iniciais e finais do segmento, que apresentaram maior dispersão.

Destaca-se que, diferentemente de outros trechos avaliados, o mês de janeiro de 2024 não apresentou uma redução acentuada nos módulos da base estabilizada. Essa constatação reforça a resiliência do material frente às condições sazonais, possivelmente devido às propriedades intrínsecas da estabilização com emulsão.

Figura 156: Variação do Módulo de Resiliência retroanálisados Base estabilizada - 40kN BR392/RS km 174



Retroanálises BR-116/RS km 495+360 ao km 495+540

A análise do trecho experimental localizado entre o km 495+360 e o km 495+540 da BR-116/RS evidencia aspectos importantes relacionados à evolução dos módulos de resiliência ao longo do período avaliado. Este segmento, construído em janeiro de 2023 como parte do RDT, não possui dados históricos anteriores, e as retroanálises foram realizadas considerando as espessuras das camadas mostradas na Figura 45. Os levantamentos ocorreram a cada 20 metros, com dados específicos de retroanálises apresentados na Tabela 27 e Tabela 28.

Os módulos retroanálisados para fevereiro de 2023, registrados na Tabela 28, indicam condições iniciais adequadas, especialmente para a camada de revestimento asfáltico, que apresentou um módulo médio de 4.627 MPa. As camadas inferiores, como a base estabilizada com emulsão e RAP (BSM-EARP) e o concreto asfáltico velho, exibiram valores de 956 MPa e 817 MPa, respectivamente, sugerindo um desempenho estrutural consistente logo após a construção. No entanto, ao comparar esses dados com os apresentados na Tabela 27, é possível observar uma

deterioração significativa, especialmente na camada de revestimento, cujos módulos reduziram-se para 1.807 MPa em janeiro de 2024 e para 1.311 MPa em abril de 2024, mesmo após a intervenção realizada em fevereiro de 2024.

A camada de BSM-EARP também sofreu uma redução considerável ao longo do período, passando de 956 MPa em fevereiro de 2023 para 709 MPa em janeiro de 2024, embora tenha apresentado uma leve recuperação para 832 MPa após a intervenção. Esses resultados apontam para uma fragilidade estrutural progressiva, possivelmente exacerbada por fissurações identificadas nos levantamentos visuais. Em contrapartida, as camadas inferiores, como a base de solo e a Subleito, mantiveram relativa estabilidade nos módulos de resiliência, variando dentro de margens esperadas e indicando menor impacto das condições de tráfego e ambientais.

Figura 157: Estrutura do pavimento - BR 116/RS km 495

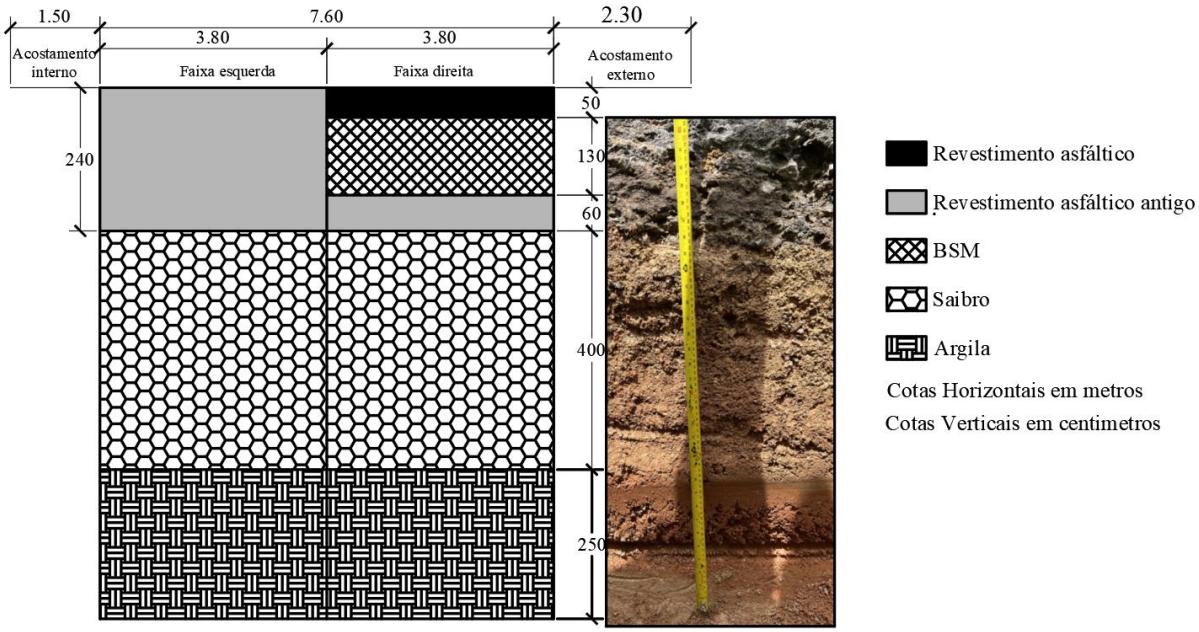


Tabela 27: Média de Módulos Retroanálisados BR 116/RS km 495

Camada	Espessura (mm)	Pista Norte - faixa pesada			
		Ano			
		Jun/23	Out/23	Jan/24	Abr/24*
Novo Concreto Asfáltico	50	-	2482	1807	1311
BSM - EARP	130	-	1235	709	832
Concreto Asfáltico Velho	60	-	1043	121	127
Base de Solo	400	-	92	94	105
Subleito	0	-	296	239	227

* dados retroanálisados após a intervenção

A avaliação realizada na Tabela 28, foi somente considerando dados do levantamento anual, logo foram realizados menos pontos que nos demais levantamentos acompanhados. Este levantamento foi realizado somente com a carga de 40kN, e contém somente quatro pontos de avaliação. A Tabela 28 traz o módulo médio para o trecho, após um mês da sua construção no ano de 2023. Essa avaliação permitiu verificar que principalmente a camada de revestimento foi deteriorando-se quando comparada aos outros meses, Tabela 27, com a camada de BSM mantendo-se com valores de modulo estáveis.

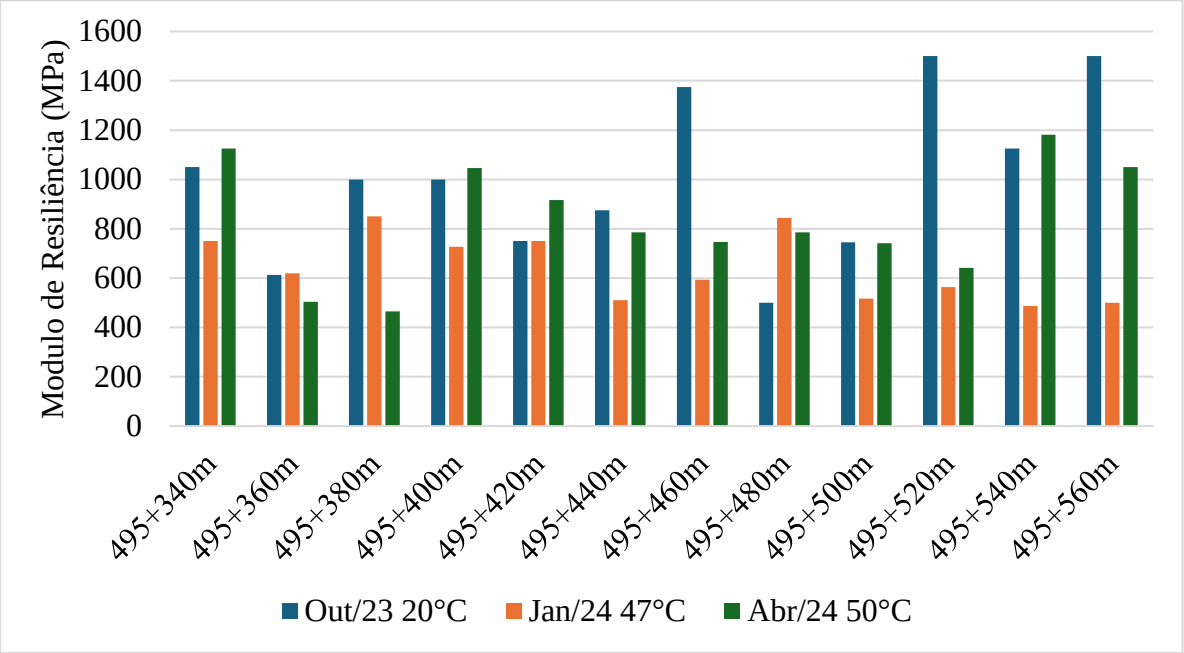
Tabela 28: Módulos Retroanálisados fevereiro 2023 - BR116/RS km 495

Camada	Espessura (mm)	Fev/23
Novo Concreto Asfáltico	50	4627
BSM - EARP	130	956
Concreto Asfáltico Velho	60	817
Base de Solo	400	159
Subleito	0	311
Erro		9%

A Figura 158, que ilustra a variação dos módulos de resiliência ao longo do segmento avaliado, corrobora a tendência de redução nos valores observada em janeiro de 2024, sugerindo que o desempenho do pavimento foi significativamente influenciado por fatores como condições climáticas, tráfego intenso e, possivelmente, limitações no processo construtivo inicial. Apesar da

intervenção em fevereiro de 2024, o ganho estrutural foi limitado, evidenciando que a recuperação completa das propriedades do pavimento não foi plenamente alcançada.

Figura 158: Variação do Módulo de Resiliência BSM - BR 116/RS km 495



4.5.2.2 Avaliação da não-linearidade a partir dos dados deflectométricos de múltiplas cargas

A avaliação dos segmentos experimentais foram realizados com múltiplas cargas conforme a Tabela 8, seguindo o preconizado pela Federal Highway Administration (2000). As avaliações para os trechos serão consideradas a partir dos valores de módulos obtidos a partir de retroanálises feitas no software BackMeDiNa, para os diferentes períodos avaliados. A avaliação da não linearidade dos materiais ocorreu levando em consideração as variações de cargas nos pavimentos na execução do ensaio de FWD. Observou-se que a variação de cargas ao realizar retroanálises, obteve-se módulos que variam em função do carregamento.

Avaliação da não linearidade dos Módulos BR-116/RS km 417 Crescente

A avaliação da não linearidade dos materiais estabilizados, ocorreu considerando-se a retroanálise dos módulos para a camada estabilizada. Para o caso da BR-116/RS km 417 Cresc. Realizou-se a avaliação dos módulos para a camada de base estabilizada para os quatro meses, com as múltiplas cargas. Os resultados estão apresentados na Figura 157, Figura 158, Figura 159 e Figura 160 apresentando respectivamente os módulos retroanálisados dos meses de junho de 2023, outubro de 2023, janeiro de 2024 e abril de 2024, realizados com múltiplas cargas. As legendas dos gráficos indicam os carregamentos utilizados em cada avaliação.

Figura 159: Módulo de resiliência - junho/23 - BR-116/RS km 417 crescente

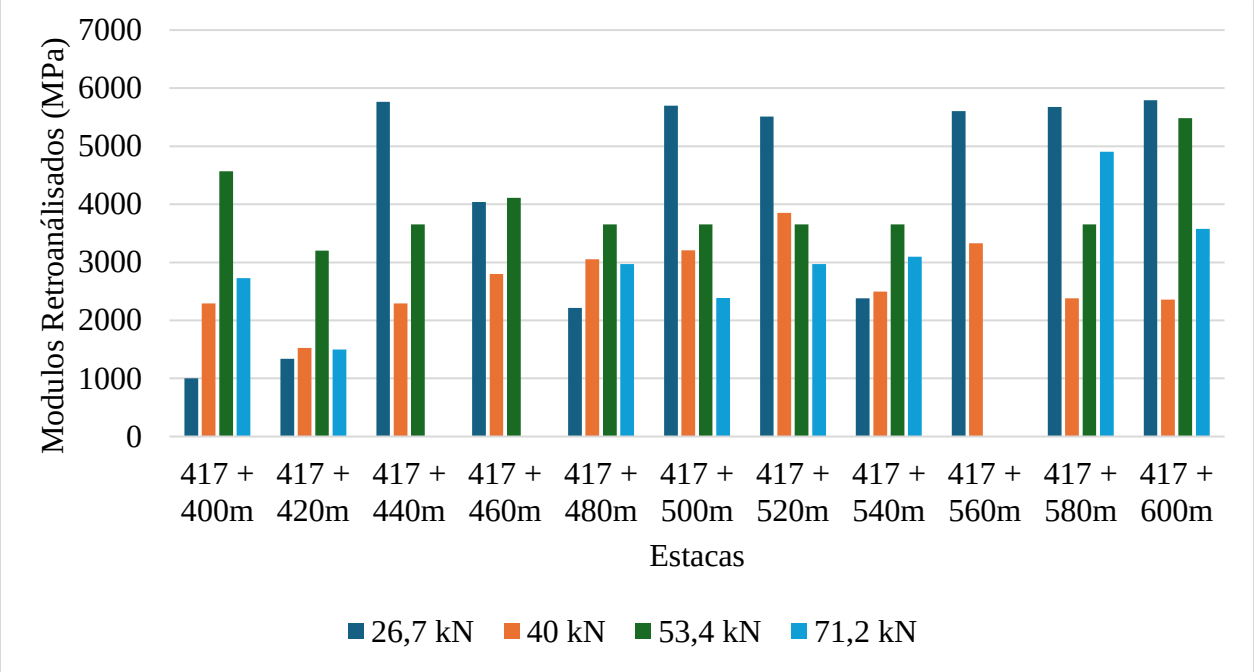


Figura 160: Módulo de resiliência - outubro/23 - BR-116/RS km 417 crescente

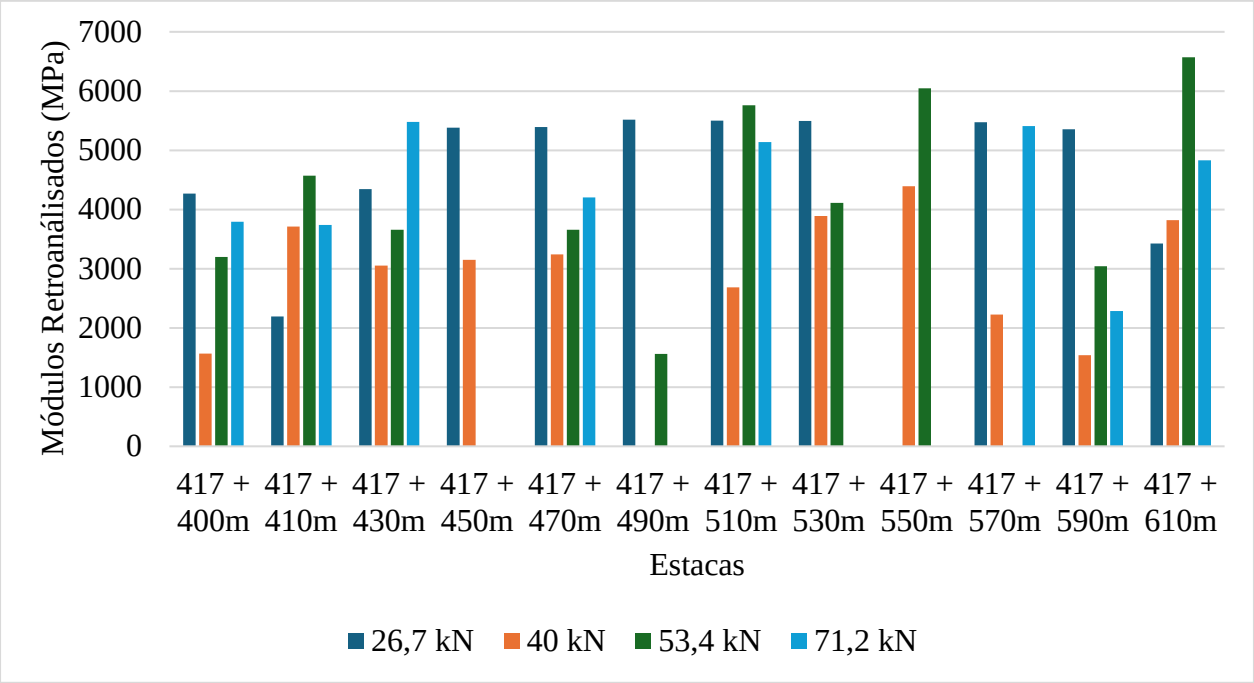


Figura 161: Módulo de resiliência - janeiro/24 - BR-116/RS km 417 crescente

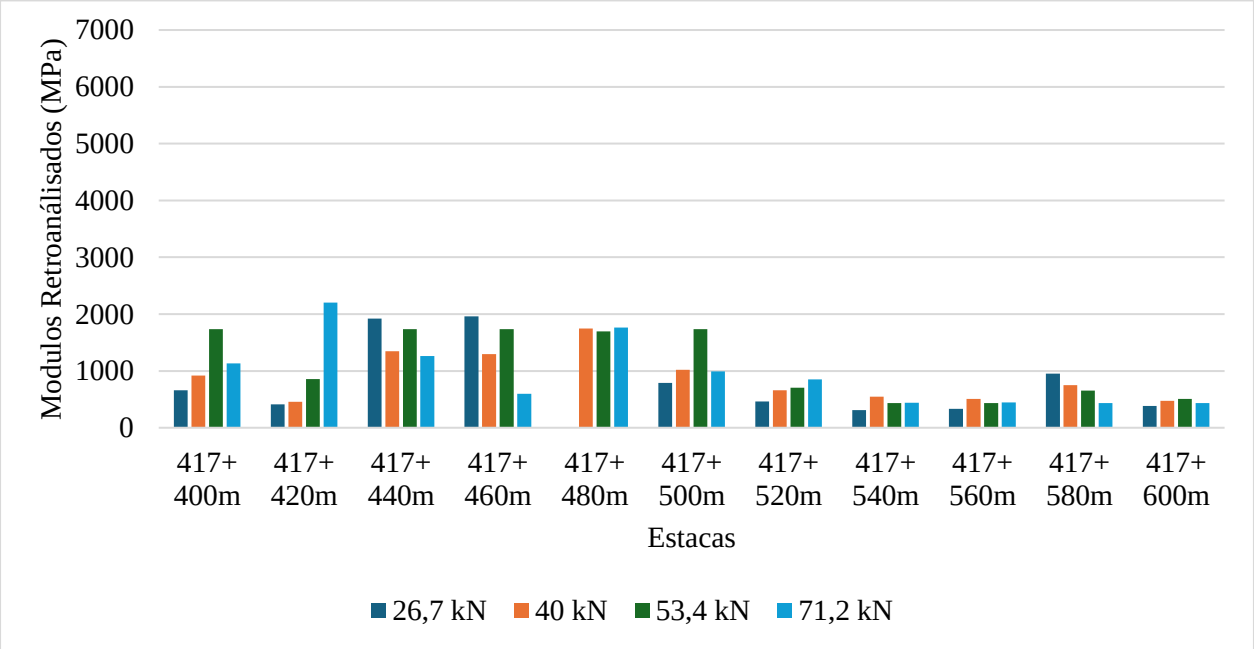
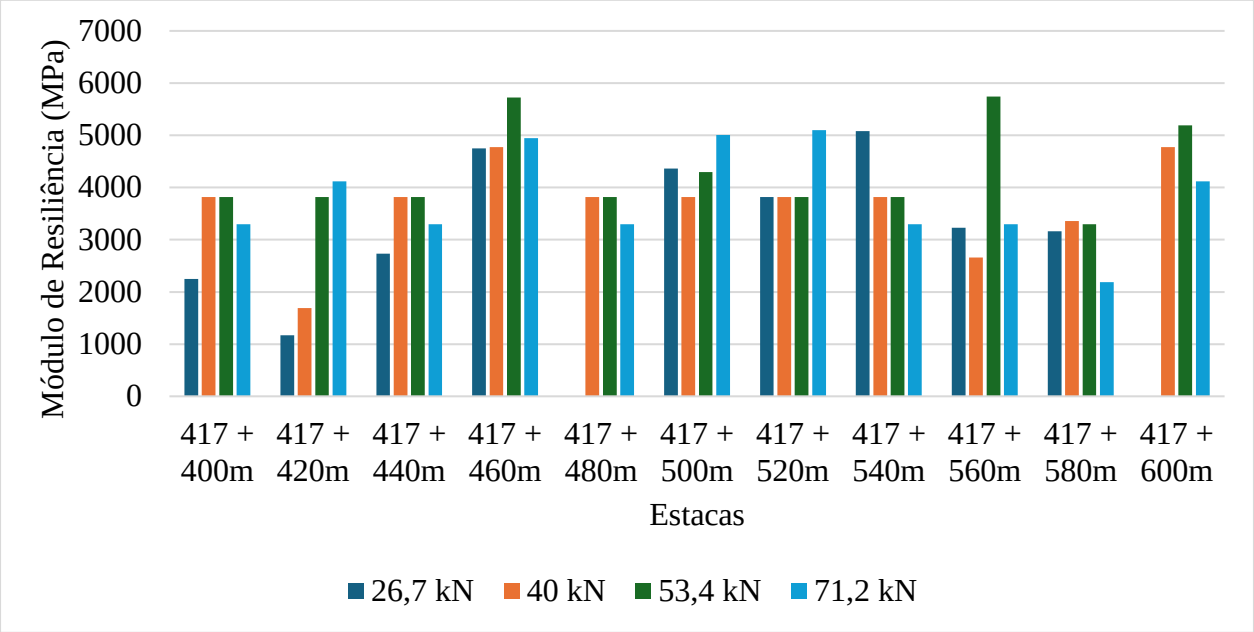


Figura 162: Módulo de resiliência - abril/24 - BR-116/RS km 417 crescente



Foi constatada uma variação significativa nos módulos retroanálisados, mesmo sendo provenientes da mesma camada e obtidos no mesmo dia de avaliação, com múltiplas cargas aplicadas e utilizando os mesmos métodos de retroanálise. Os dados considerados muito dispersos foram removidos das análises, bem como o erro RMS para todos ficou abaixo dos 5%.

Observou-se que os módulos do mês de janeiro, Figura 161, foram consideravelmente mais baixos em comparação aos módulos retroanálisados nos outros meses. Este comportamento sugere que, além das variações decorrentes das cargas aplicadas, a sazonalidade exerce um impacto relevante sobre os módulos das bases estabilizadas. Adicionalmente, verificou-se que, em alguns casos, o aumento da carga resultou em módulos maiores. Por exemplo, para um mesmo ponto, o módulo correspondente a uma carga de 71,2 kN foi ligeiramente superior ao obtido com uma carga de 26,7 kN.

Esses resultados reforçam a importância de considerar tanto os efeitos da sazonalidade quanto a influência das diferentes intensidades de carga na análise da não linearidade e no comportamento mecânico das camadas estabilizadas, contribuindo para um entendimento mais robusto do desempenho estrutural ao longo do tempo.

Avaliação da não linearidade dos Módulos BR-116/RS km 417 Decrescente

A avaliação da não linearidade dos materiais estabilizados também foi realizada para o segmento no sentido decrescente do km 417 da BR-116/RS, utilizando múltiplas cargas como critério de análise. Os resultados estão apresentados na Figura 163, Figura 164, Figura 165 e Figura 166, correspondendo, respectivamente, aos meses de junho de 2023, outubro de 2023, janeiro de 2024 e abril de 2024. Assim como no trecho crescente, os dados que apresentaram grande variabilidade foram removidos das análises, garantindo maior consistência nos resultados.

Os módulos retroanálisados indicam que, no mês de janeiro, os valores observados a Figura 165 foram inferiores aos observados nos demais meses, reforçando a influência da sazonalidade sobre o comportamento mecânico das bases estabilizadas. Além disso, foi identificada uma variação dos módulos em função da carga aplicada, o que evidencia a variabilidade intrínseca do material frente a diferentes condições de carregamento.

Entretanto, diferentemente do comportamento observado no trecho crescente, não foi possível estabelecer uma tendência clara de que cargas maiores ou menores resultem em módulos mais elevados. Isso sugere que o comportamento do material estabilizado pode variar em função de outros fatores além da carga aplicada, como a heterogeneidade do material, condições locais ou mesmo interações específicas entre os parâmetros avaliados.

Figura 163: Módulo de resiliência - junho/23 - BR-116/RS km 417 decrescente

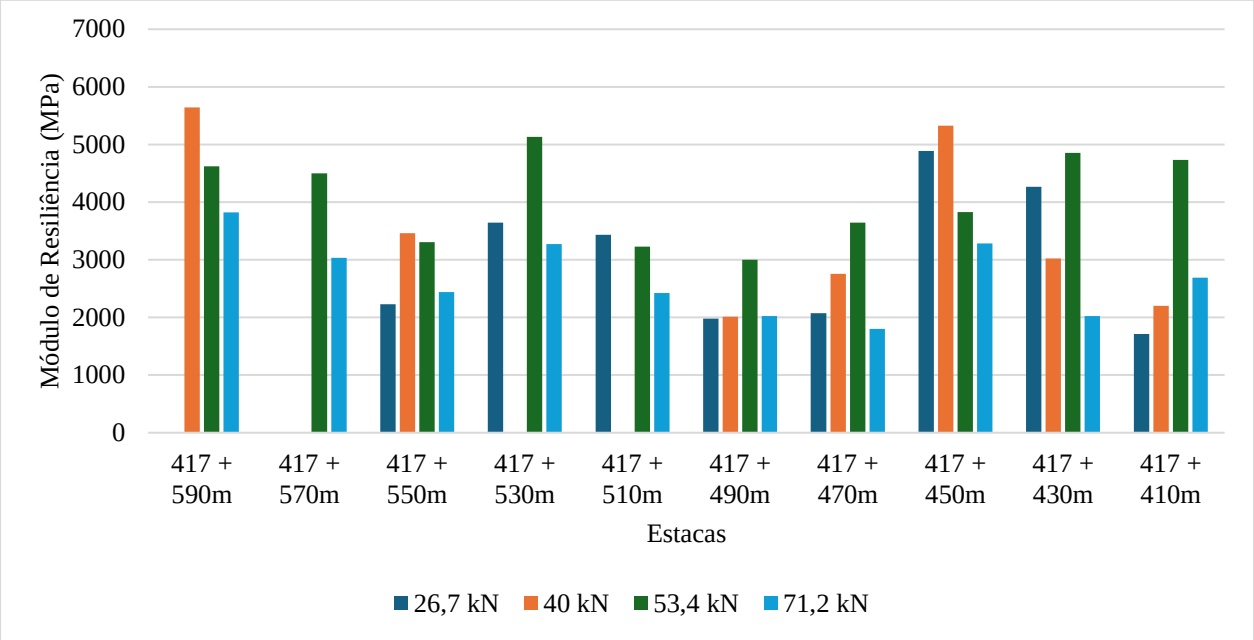


Figura 164: Módulo de resiliência – outubro/23 - BR-116/RS km 417 decrescente

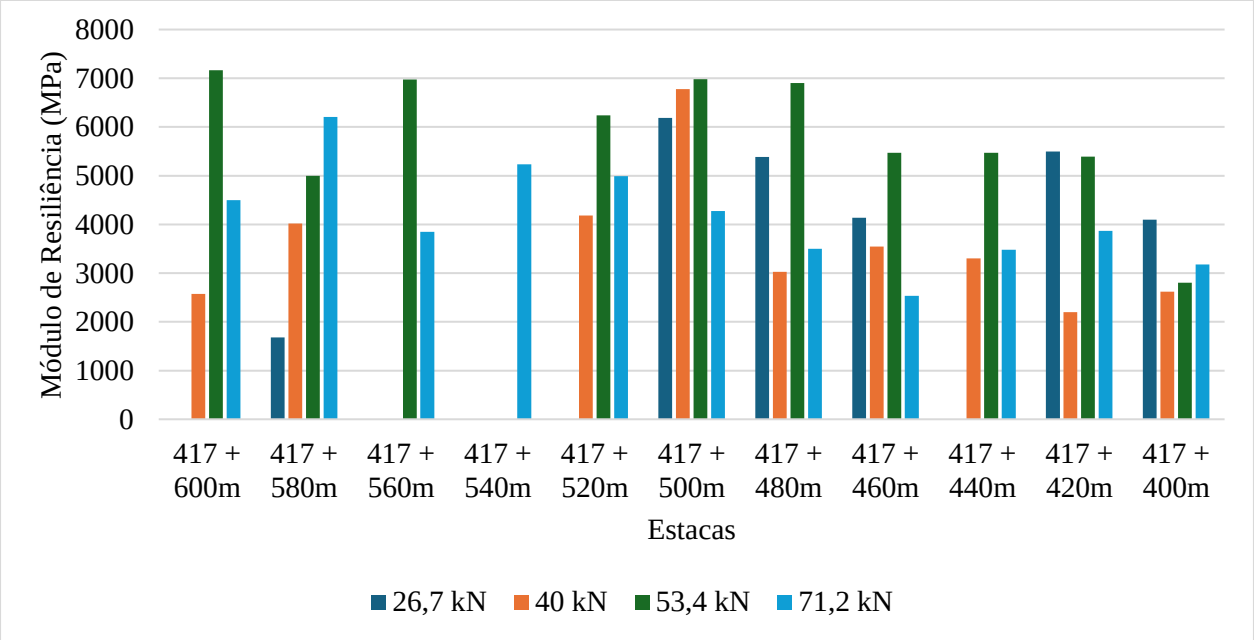


Figura 165: Módulo de resiliência - janeiro/24 - BR-116/RS km 417 decrescente

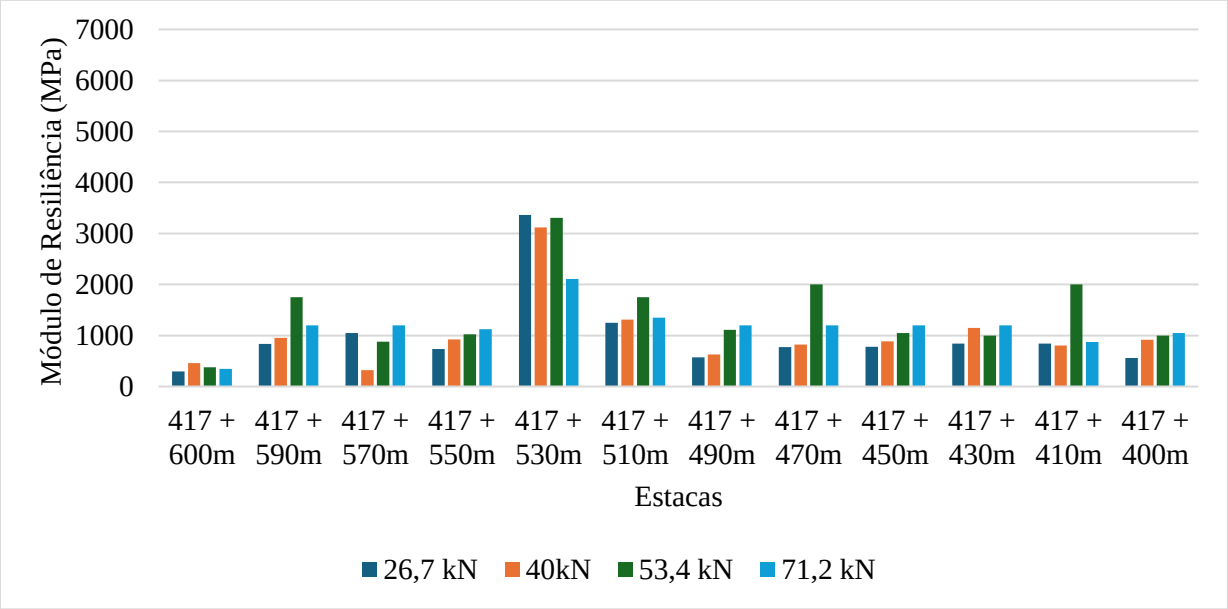
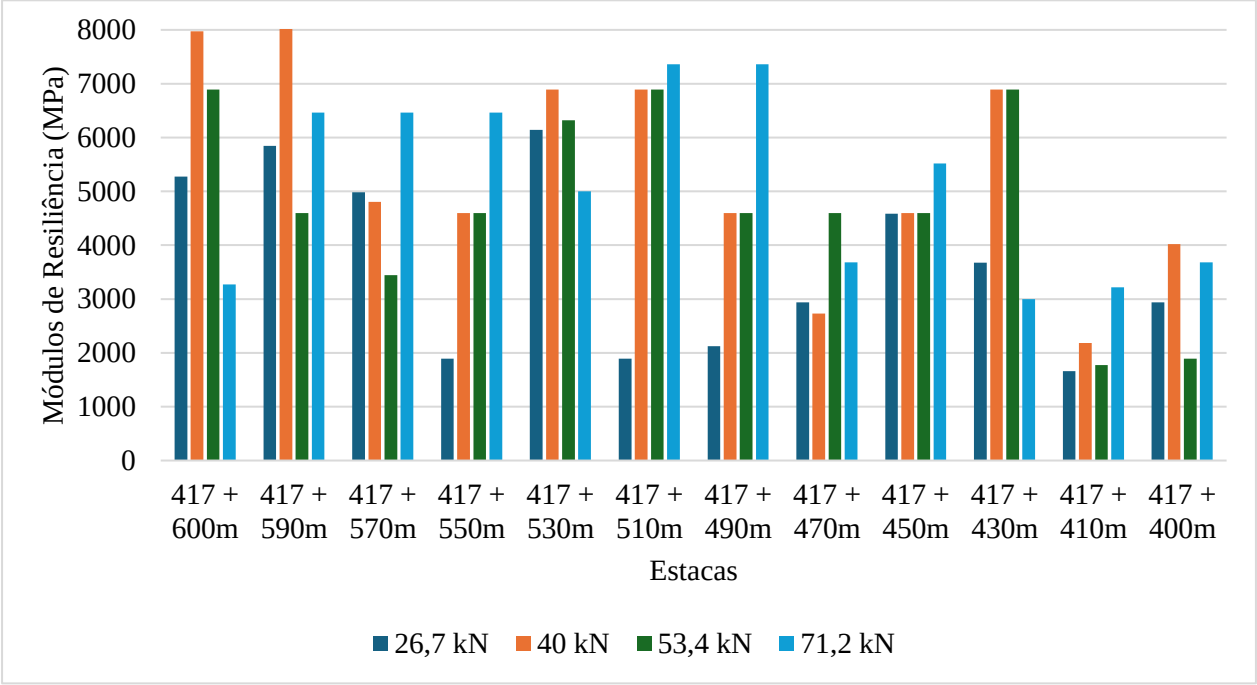


Figura 166: Módulo de resiliência - abril/24 - BR-116/RS km 417 decrescente



Avaliação da não linearidade dos Módulos BR-392/RS – km 174

O trecho do km 174 da BR-392/RS, construído em 2011, apresenta características distintas em relação aos outros segmentos avaliados. Devido à extensão do trecho e à presença de variações significativas nos dados, foram removidos os valores com grandes dispersões, assim como as primeiras e últimas estacas, a fim de garantir maior consistência nos resultados apresentados.

Os módulos retroanálisados para diferentes cargas mostraram variações consideráveis, com valores de módulo de resiliência superiores aos reportados por Dias et al. (2023), tanto em ensaios triaxiais quanto nas retroanálises realizadas. A Figura 167, Figura 168, Figura 169 e Figura 170 mostram os módulos de resiliência obtidos para os meses de junho de 2023, outubro de 2023, janeiro de 2024 e abril de 2024, respectivamente.

As bases estabilizadas apresentaram comportamento não linear em relação às cargas aplicadas nos ensaios FWD. Isso é evidenciado pela variação dos módulos de resiliência para diferentes níveis de carga, o que reflete a sensibilidade do material à intensidade de carregamento.

Em diversas situações, as cargas mais elevadas (como 71,2 kN) resultaram em módulos de resiliência mais altos quando comparados a cargas menores (como 26,7 kN). Esse comportamento pode estar associado à compactação adicional do material sob cargas maiores ou a uma resposta estrutural mais rígida da camada estabilizada nessas condições.

A variação de carga tem impactos diferenciados dependendo do período avaliado. Por exemplo, nos meses mais críticos, como janeiro, Figura 169, os módulos retroanálisados apresentam redução em relação aos outros meses, mesmo para cargas maiores. Isso sugere que fatores sazonais, como temperatura e umidade, interagem com a resposta do material às cargas.

Figura 167: Módulo de resiliência - junho/23 - BR-392/RS km 174 decrescente

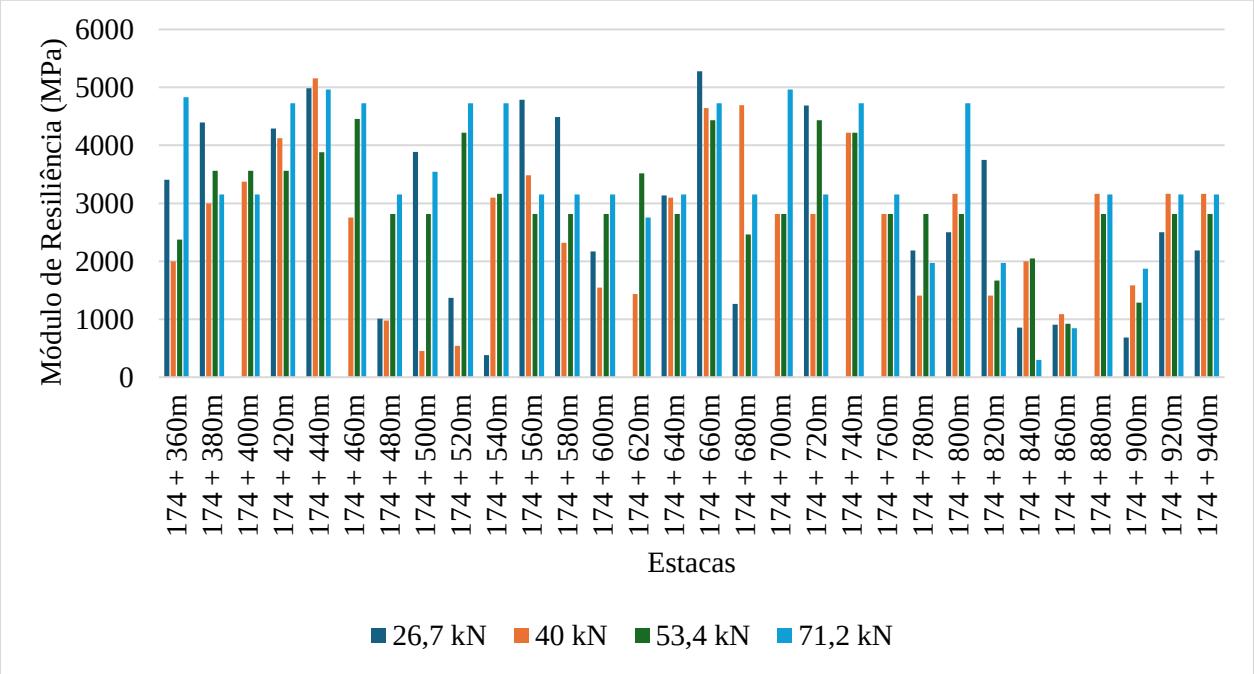


Figura 168: Módulo de resiliência – outubro/23 - BR-392/RS km 174 decrescente

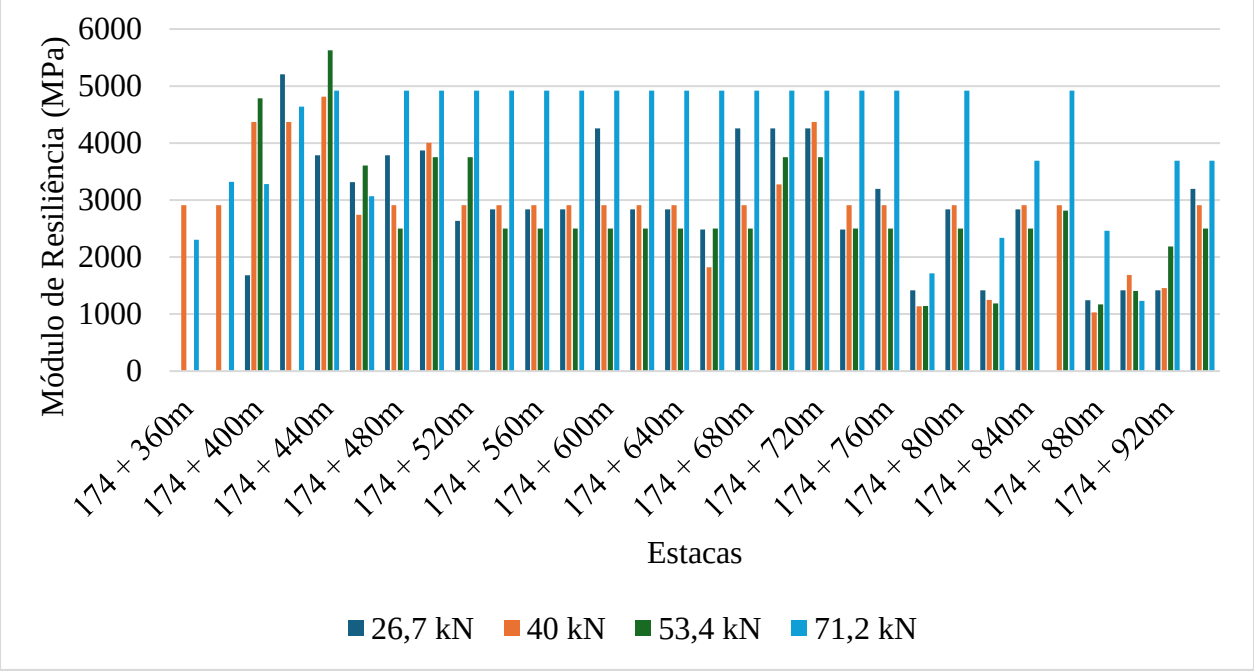


Figura 169: Módulo de resiliência - janeiro/24 - BR-392/RS km 174 decrescente

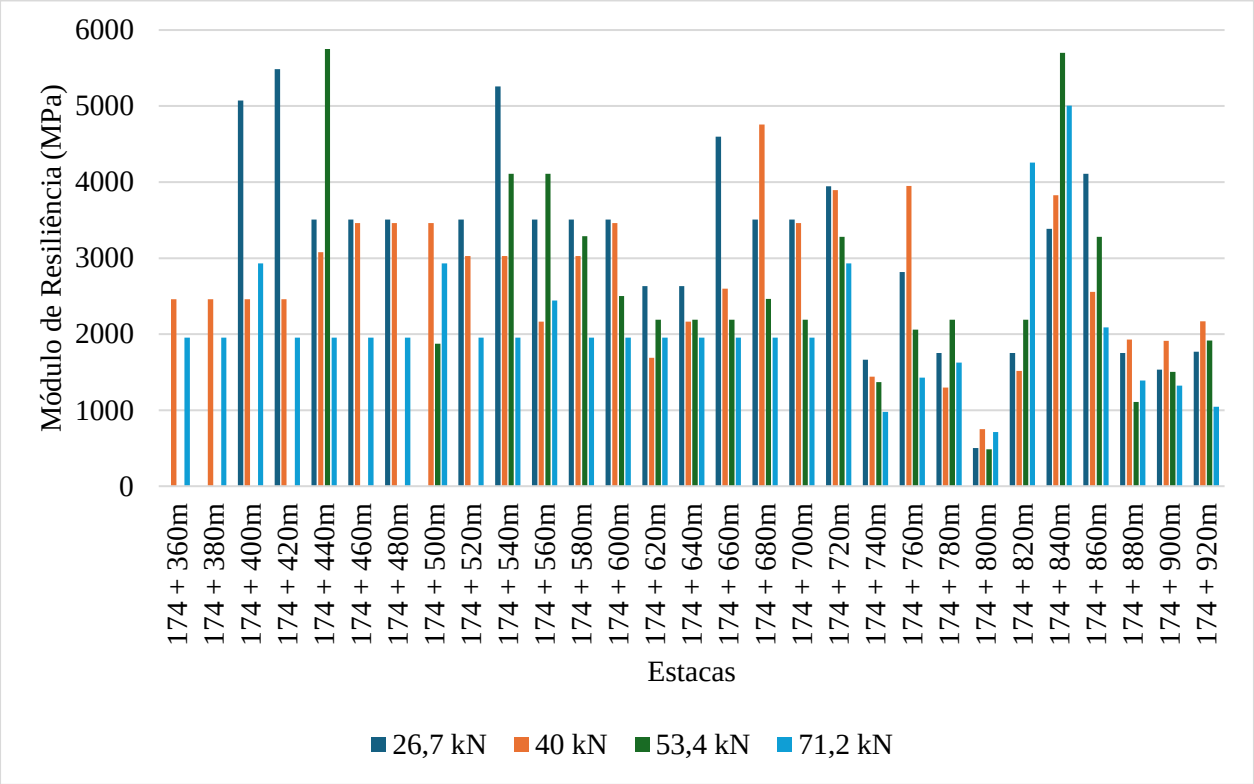
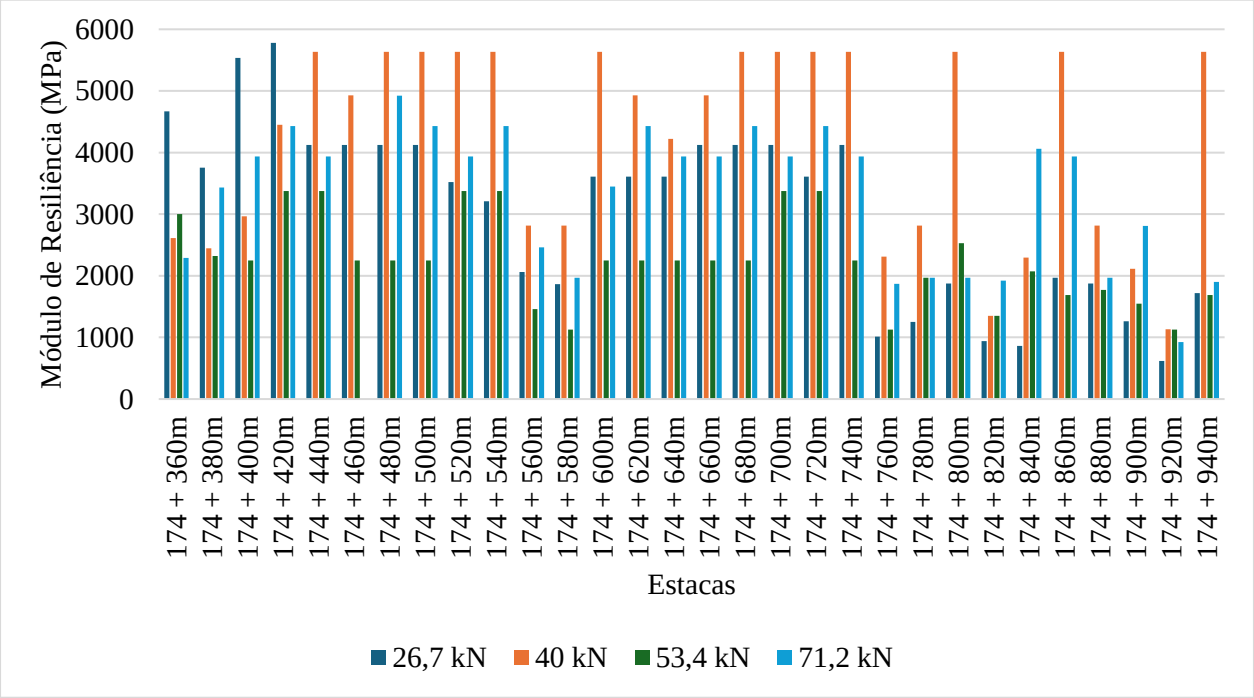


Figura 170: Módulo de resiliência - abril/24 - BR-392/RS km 174 decrescente



A variação de carga influencia significativamente o desempenho das bases estabilizadas, alterando os módulos de resiliência de forma não linear. Cargas maiores tendem a gerar módulos mais elevados, mas essa tendência pode ser modulada por condições sazonais e propriedades específicas do material. Esses resultados destacam a importância de considerar a carga aplicada como um fator crítico em análises estruturais e na definição de estratégias de manutenção para pavimentos estabilizados.

Avaliação da não linearidade dos Módulos BR-116/RS km 506

O segmento avaliado no km 506 da BR-116/RS, construído em 2019, está localizado na faixa destinada ao tráfego pesado, caracterizando-se pela aplicação dos maiores carregamentos na rodovia. A base estabilizada desse trecho apresenta uma composição diferenciada, incluindo material fresado de pavimentos asfálticos reciclados (RAP), o que a distingue das bases utilizadas no km 417 da BR-116/RS e no km 174 da BR-392/RS.

Os módulos de resiliência retroanálisados com as múltiplas cargas, apresentaram variações ao longo do trecho, bem como devido ao aumento de carga. Devido a extensão do trecho removeu-se as primeiras e última estacas, para excluir a variabilidade da transição de materiais.

As Figura 171, Figura 172, Figura 173 e Figura 174 apresentam os valores dos módulos retroanálisados. Observou-se que o incremento de carga gera um aumento do módulo retroanálisados, ou seja, cargas maiores levam a módulos mais elevados. Ressalta-se que todas as retroanálises consideraram os mesmos parâmetros no software BackMeDiNa.

A análise das figuras confirma que o incremento de carga gera um aumento dos módulos retroanálisados, evidenciando o comportamento não linear da base estabilizada. Essa característica pode ser atribuída à presença de RAP na composição, que confere maior rigidez à camada sob carregamentos elevados.

Os resultados reforçam a importância de considerar a influência da carga na análise de pavimentos estabilizados, especialmente em faixas de tráfego pesado. Essa informação é crucial para o dimensionamento e a manutenção adequada, garantindo o desempenho estrutural e funcional ao longo do tempo.

Figura 171: Módulo de resiliência – junho/23 - BR-116/RS km 506

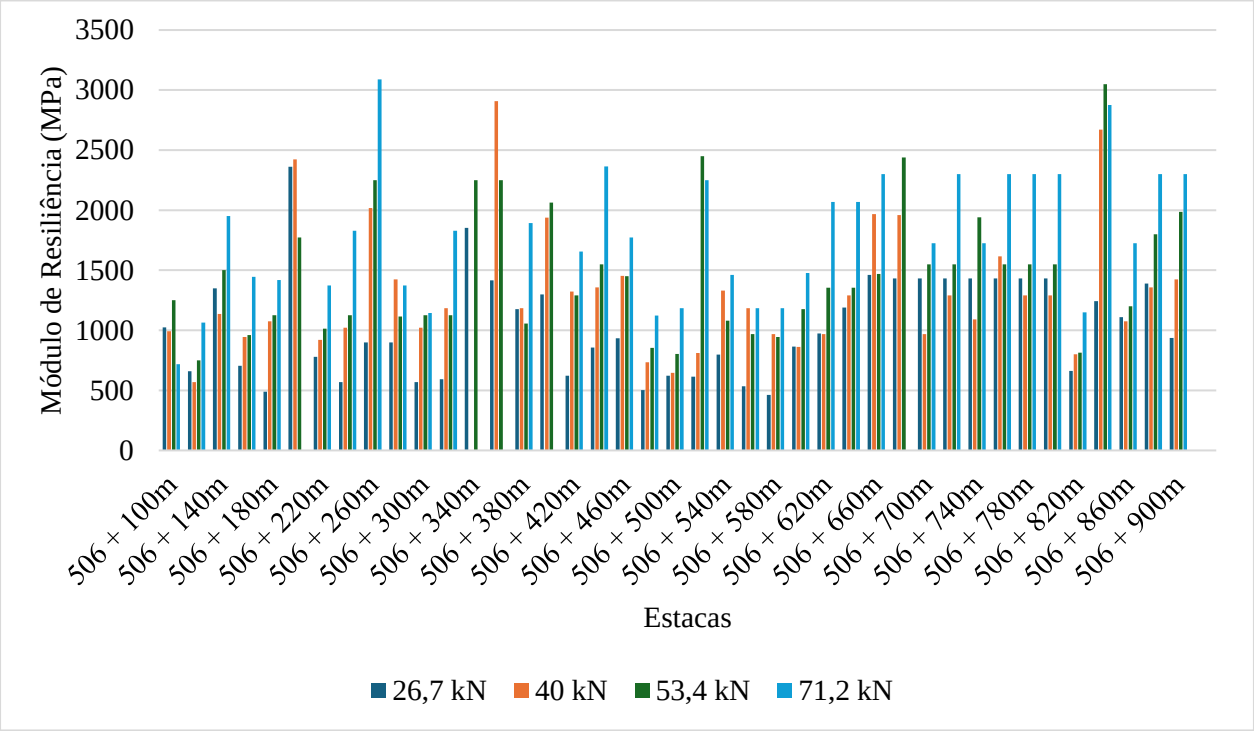


Figura 172: Módulo de resiliência – outubro/23 - BR-116/RS km 506

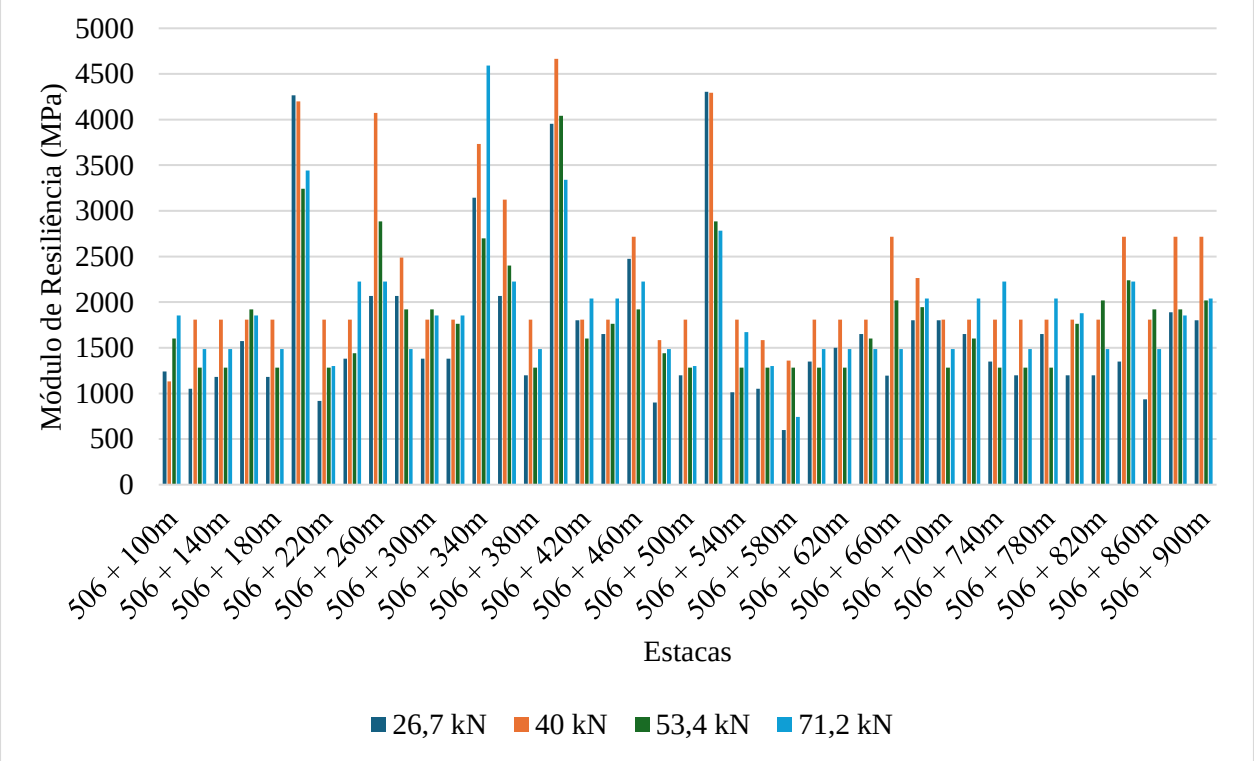


Figura 173: Módulo de resiliência – janeiro/24 - BR-116/RS km 506

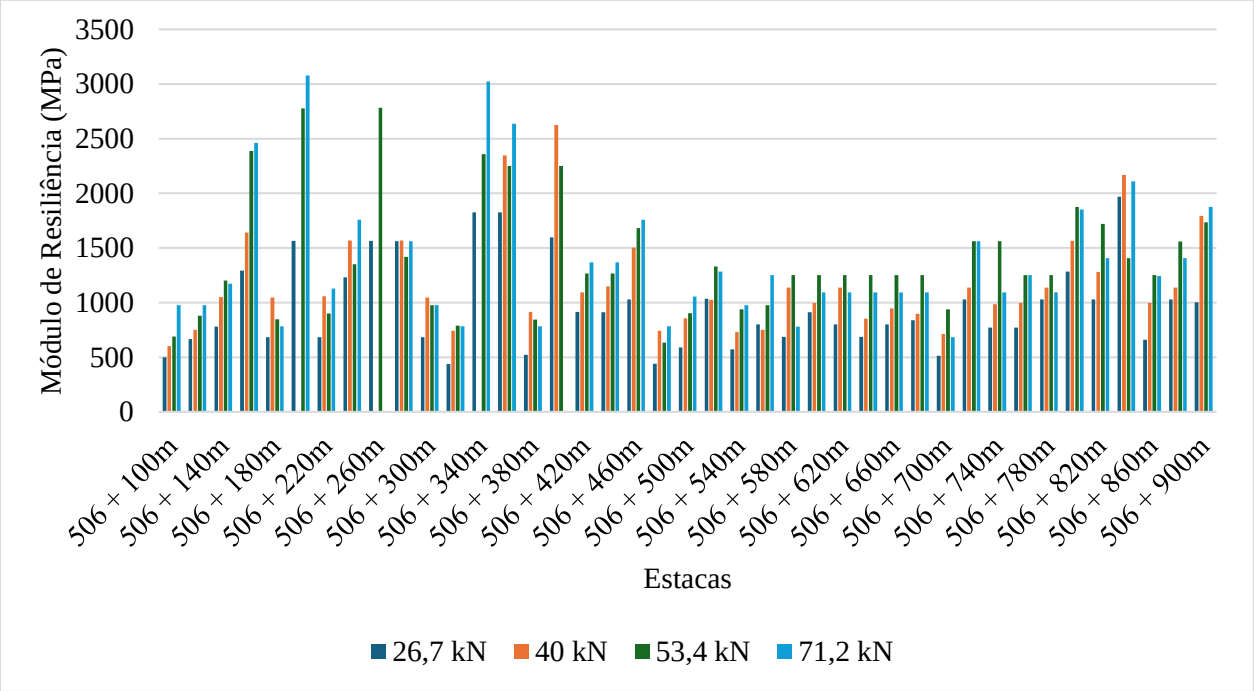
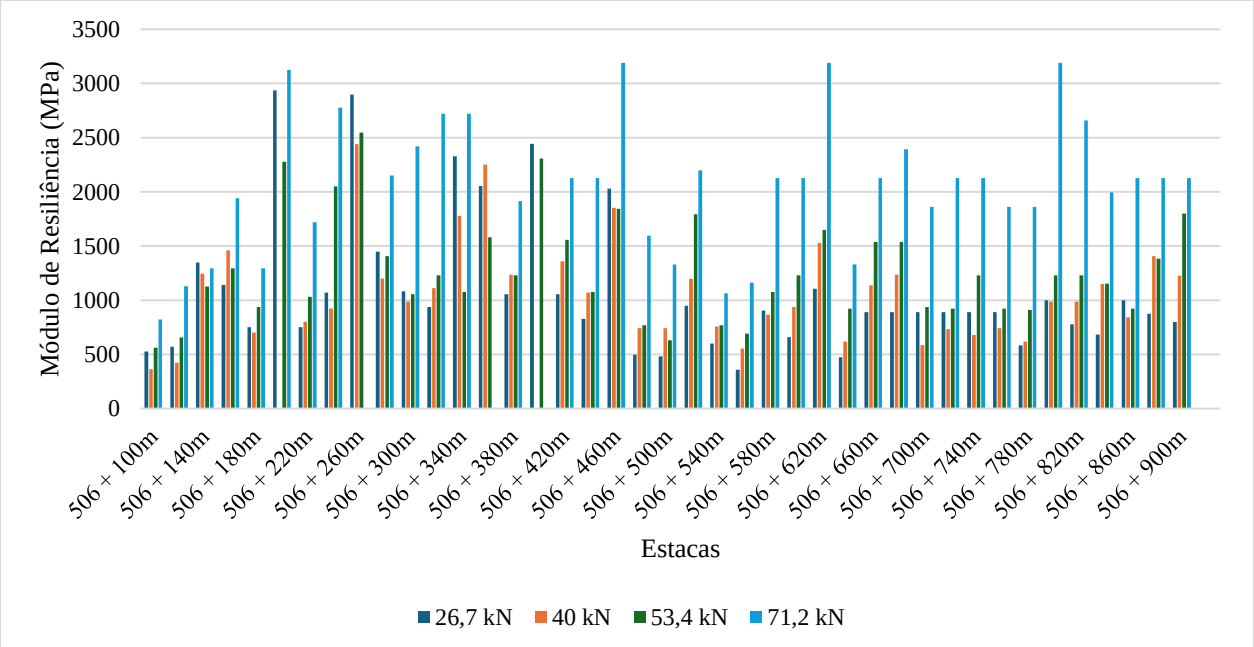


Figura 174: Módulo de resiliência – abril/24 - BR-116/RS km 506



Avaliação da não linearidade dos Módulos BR-116/RS – km 495

A análise do km 495 da BR-116/RS foi realizada de forma controlada, abrangendo todas as etapas de coleta de dados, tanto em campo quanto em laboratório. Esse trecho, construído em janeiro de 2023, foi avaliado com foco na retroanálise dos módulos de resiliência para múltiplas cargas, complementada por ensaios triaxiais monotônicos. A Tabela 29 sintetiza os valores mínimos, médios e máximos obtidos no ensaio triaxial.

Tabela 29: Valores mínimo, médio e máximo de triaxial monotônico

	Mínimo	Médio	Máximo
MR (MPa)	654	1299	2057

A avaliação das Figura 175, Figura 176 e Figura 177 que representam os módulos de resiliência retroanálisados para o km 495 da BR-116/RS nos meses de outubro de 2023, janeiro de 2024 e abril de 2024, permite observar tendências relevantes relacionadas ao comportamento mecânico do material estabilizado em função do tempo e das condições sazonais.

A Figura 175 apresenta os módulos retroanálisados obtidos no mês de outubro de 2023. Os valores demonstram uma distribuição relativamente uniforme ao longo do trecho, com módulos superiores aos observados nos meses subsequentes. Essa característica pode ser atribuída a condições climáticas favoráveis, como menores níveis de umidade e temperaturas mais amenas, que preservam a rigidez da base estabilizada.

A Figura 176 mostra os resultados para janeiro de 2024, período em que os módulos apresentam uma leve redução em relação ao mês de outubro. Essa redução pode ser explicada pela influência de condições sazonais adversas, como temperaturas mais elevadas e maior probabilidade de saturação do material devido às chuvas intensas. Apesar disso, os módulos permanecem em uma faixa coerente com os valores esperados para o tipo de material analisado.

A Figura 177 evidencia os menores valores de módulo de resiliência entre os meses avaliados. Essa redução significativa pode ser atribuída ao impacto acumulado de condições climáticas desfavoráveis ao longo do período chuvoso, combinado com possíveis alterações estruturais na base estabilizada, como perda temporária de rigidez devido à maior umidade residual.

Ao correlacionar os dados apresentados nas três figuras, observa-se uma tendência clara de redução dos módulos ao longo do período avaliado, culminando nos menores valores em abril de 2024. Essa variação reflete a influência da sazonalidade sobre o comportamento mecânico da base estabilizada, destacando a sensibilidade do material às condições ambientais.

Além disso, a relação entre os valores de módulo e as cargas aplicadas permanece consistente em todos os meses, com cargas maiores resultando em módulos mais elevados. Esse padrão confirma a não linearidade do material, comportamento típico de bases estabilizadas. Além disso, pode-se observar na Figura 175, Figura 176 e Figura 177 a influência conjunta da sazonalidade e da variação de carga no desempenho da base estabilizada do km 495 da BR-116/RS. Os resultados reforçam a necessidade de considerar as condições climáticas locais e a interação entre cargas aplicadas e comportamento do material.

Figura 175: Módulo de resiliência – outubro/23 - BR-116/RS km 495

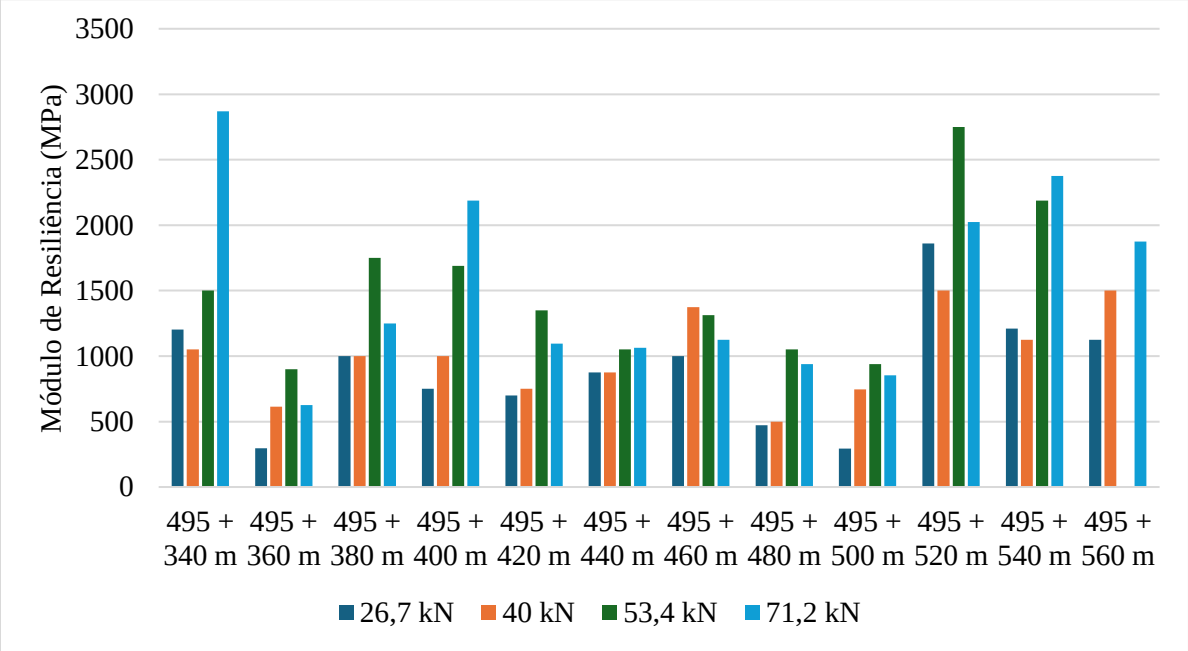


Figura 176: Módulo de resiliência – janeiro/24 - BR-116/RS km 495

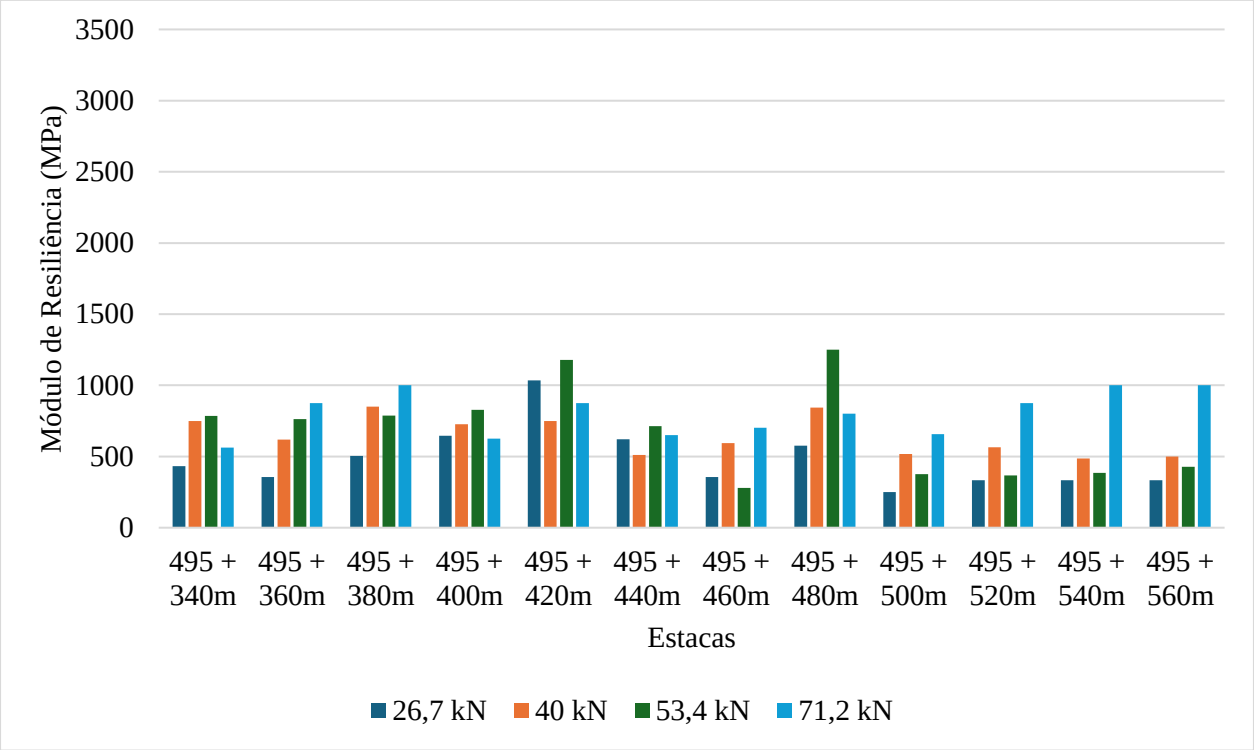
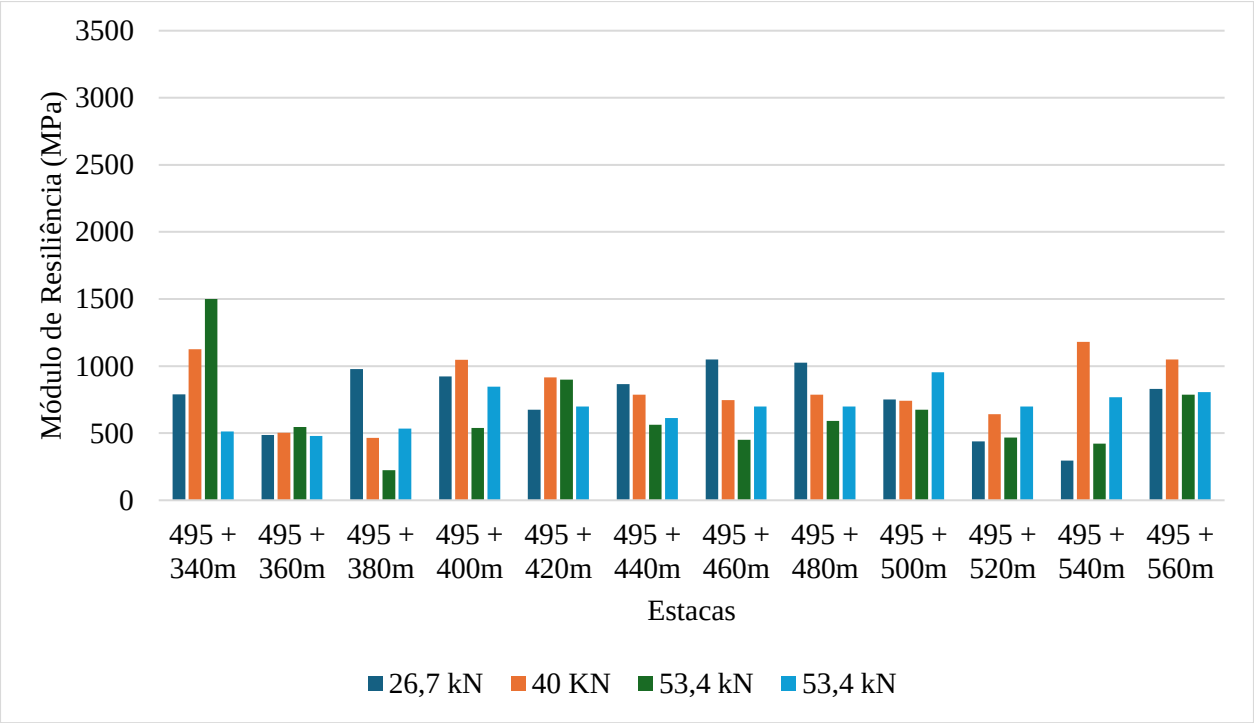


Figura 177: Módulo de resiliência – abril/24 - BR-116/RS km 495



Os módulos retroanálisados para o trecho 495 da BR-116/RS, apesar de mais baixos que os de outros trechos experimentais, apresentam boa concordância com os resultados obtidos nos ensaios triaxiais. Essa consistência destaca a adequação da metodologia aplicada para avaliar o desempenho mecânico da base estabilizada.

A influência da variação de carga foi confirmada, com cargas maiores gerando módulos mais elevados, evidenciando a não linearidade do material. Esses resultados são essenciais para o entendimento do comportamento da base estabilizada e para o planejamento de ações de manutenção e dimensionamento estrutural da rodovia

4.5.2.3 Estimativa de emissões por meio de Análise de Ciclo de Vida – ACV

4.5.2.3.1 Definições Preliminares

A avaliação dos ciclos de vida do material foi realizada em duas etapas, com contextualização no relatório parcial 2 e obtenção dos dados de simulação da estimativa do ciclo de vida do componente no relatório parcial 3. Assim, a fim de manter a coesão do item, uniu-se as partes no presente relatório final.

Segundo a NBR ISO 14040 (ABNT 2022) o desenvolvimento de uma ACV inicia pela definição do objetivo e escopo, para que então seja elaborado um inventário do ciclo de vida e determinados os potenciais impactos ambientais. O escopo é definido de acordo com as etapas do ciclo de vida (módulos de análise) que serão consideradas. A Figura 178 apresenta os módulos de análise da ISO 21930 Sustainability in buildings and civil engineering works — Core rules for environmental product declarations of construction products and services (ISO, 2017). A

Figura **179** apresenta de forma esquemática as etapas genéricas do ciclo de vida de uma estrutura de pavimento, além de destacar os módulos de análise reconhecidos pela ISO 21930:2017.

Os itens da definição do objetivo e escopo que foram considerados no projeto são:

Os itens da definição do objetivo e escopo que foram considerados no projeto são:

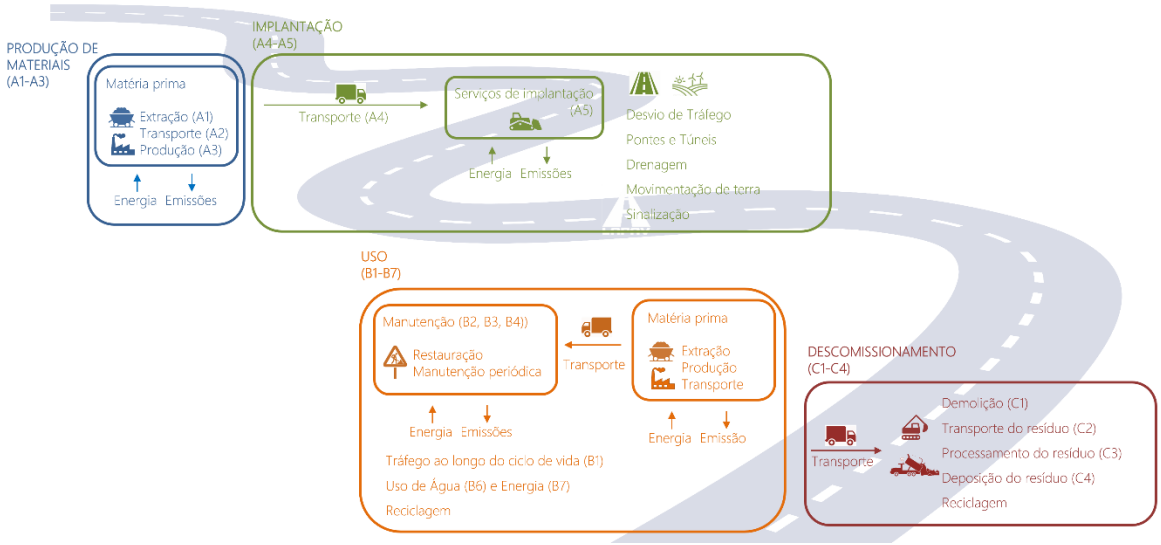
- Unidade declarada: 100 toneladas de BSM.

- Fronteiras do sistema: Berço ao portão (cradle-to-gate), abrangendo os módulos A1-A3 da ISO 21930 (ISO, 2017) e BS EN 15804:2012 + A2:2019 (CEN, 2022) Figura 178.
    - Materiais (A1): inclui a extração e manufatura das matérias-primas,
    - Transporte (A2) engloba o transporte das matérias-primas até a usina,
    - Produção (A3) compreende as operações da usina relativas à produção da BSM. Ressalta-se a análise proposta no presente RDT levara em consideração o trecho experimental construído na BR 116/RS km 495. Assim, todas as distancias, processos de obtenção de materiais e a sua manufatura, levarão em conta a localização e a usina utilizada, situada em Capão do Leão/RS e o trecho experimental.
- Procedimentos de alocação: Na contabilização dos impactos relacionados à produção da BSM na usina, a alocação dos recursos é feita em massa.
- Método de análise de impactos utilizou-se o método de avaliação de impacto ReCiPe (versão 1.13) Midpoint (I((Individualista, curto prazo de interesse - em geral 20 anos)) e Endpoint (E, A(Igualitária, longo prazo, 500 anos, 1000 anos, infinito, dependendo da categoria de impacto));
- Fonte de dados: Foreground: quantitativos da mistura, energia despendida pela usina, localização dos fornecedores a da usina, para cálculo das distâncias de transporte (considerando o traço e as informações referente a mistura BSM-RE-nE, aplicada no km 495 da BR 116/RS); Background: base de dados Ecoinvent.

Figura 178: Módulos de análise da ISO 21930 (ISO, 2017) e BS EN 15804:2012 + A2:2019 (CEN, 2022)

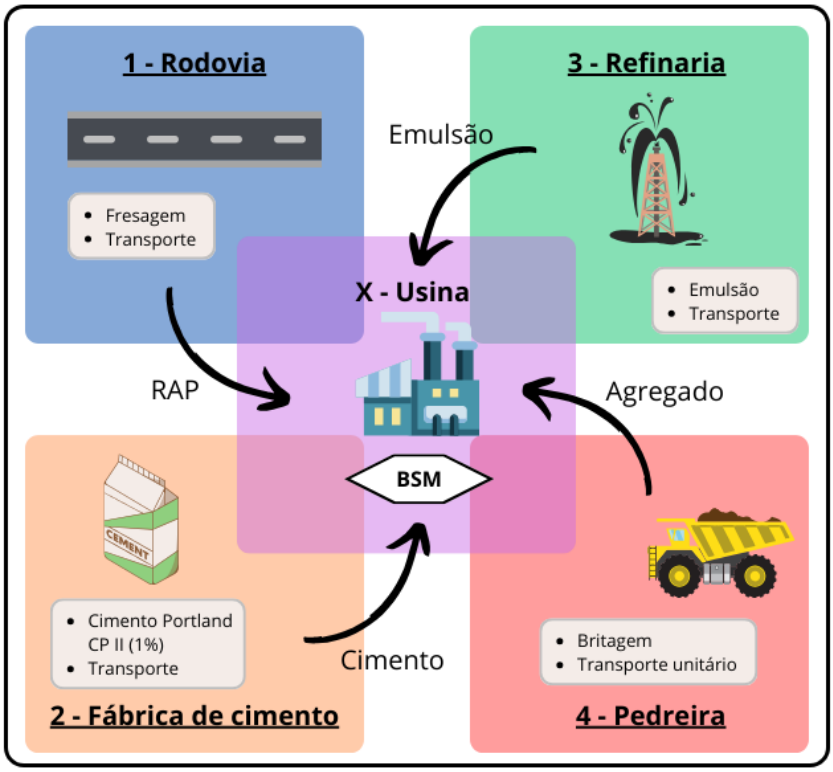
Produção			Construção		Uso							Fim de vida				Além das Fronteiras do Sistema
Matéria-prima	Transporte	Produção	Transporte	Construção	Uso	Manutenção	Reparo	Reabilitação	Reforma	Uso de energia	Uso de água	Demolição	Transporte	Processamento do resíduo	Descarte	Potencial reuso, recuperação e/ou reciclagem
A1	A2	A3	A4	A5	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	C1	C2	C3	C4	D
X	X	X	NI	NI	NI	NI	NI	NI	NI	NI	NI	NI	NI	NI	NI	NI

Figura 179: Ciclo de vida de um pavimento e módulos de análise



Para a realização da modelagem dos impactos ambientais causados pela produção de BSM, utilizou-se o software gratuito OpenLCA v.2.0.1 em conjunto com a base de dados Ecoinvent versão 3.7. A Figura 180 representa esquematicamente os cinco fluxos considerados dentro do escopo definido. Os fluxos 1 a 4 são equivalentes à produção dos materiais utilizados na mistura, enquanto o fluxo "X" equivale à mistura dos quatro produtos anteriores, resultando na BSM.

Figura 180: Esquema dos fluxos de produção da BSM



4.5.2.3.2 Construção do inventário

Com base nas definições preliminares, apresentadas no item 4.5.2.3.1, o módulo dos materiais (A1) corresponde à produção do RAP, cimento Portland, emulsão asfáltica e agregados; o módulo do transporte (A2) corresponde às distâncias percorridas pelas matérias-primas até a usina (campo/rodovia-usina, refinaria-usina, fábrica de cimento-usina e pedreira-usina); e o módulo da produção (A3) corresponde à operação da usina para a produção da mistura BSM.

A discriminação dos processos utilizados em cada fluxo de saída, bem como as quantidades, unidades e itens da base de dados, está apresentada na Tabela 30. Vale destacar que as quantidades informadas foram calculadas com base na produção de 100 toneladas de BSM, e seu procedimento de cálculo está descrito nos subcapítulos correspondentes a cada material.

Tabela 30: Descrição dos fluxos de produção da BSM

Fluxo de saída	Fluxo de entrada	Quantidade		Un.	Módulo	Ecoinvent
RAP	Energia para fresagem	90,41		kWh	A1	Diesel, burned in building machine | diesel, burned in building machine | cut-off, U – GLO.
	Distância percorrida pela fresadora	15,68	0,076	t.km	A1	Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 | transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 | Cutoff, U – RoW.
	Caminhão de transporte da fresadora (usina-campo + campo-usina)	14	100	t.km	A2	Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 | transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 | Cutoff, U – RoW.
	Caminhão com fresado (campo-usina)	31,36	50	t.km	A2	Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 | transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 | Cutoff, U – RoW.
Cimento	Cimento CP II	0,98		t	A1	Cement, limestone 6-10% | cement production, limestone 6-10% | cement limestone 6-10% | Cut-off U-BR.
	Transporte da fábrica de cimento para a usina	0,98	250	t.km	A2	Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 | transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 | Cutoff, U – RoW.
Emulsão	Ligante asfáltico	2,00		t	A1	Pitch production, petroleum refinery operation | pitch | Cutoff, U – BR.
	Água	1,33		t	A1	Tap water | tap water production, conventional treatment | tap water | Cut-off U-BR.
	Energia para mistura - **Tabela 31**	8,21		kWh	A1	Electricity voltage transformation from high to medium voltage | electricity, medium voltage | Cutoff, U - BR-Southern grid.

Fluxo de saída	Fluxo de entrada	Quantidade		Un.	Módulo	Ecoinvent
	Transporte da refinaria para a usina	3,33	280	t.km	A2	Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 | transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 | Cutoff, U – RoW.
Agregado	Britagem do agregado	65,66		t	A1	Gravel, crushed | gravel production, crushed | gravel crushed | Cutoff U-BR.
	Transporte unitário dentro da usina	65,66	1,00	t.km	A2	Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 | transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 | Cutoff, U – RoW.
BSM	RAP	31,36		t	A1	Fluxo de saída – RAP.
	Cimento	0,98		t	A1	Fluxo de saída – Cimento.
	Emulsão	2,00		t	A1	Fluxo de saída – Emulsão.
	Agregado	65,66		t	A1	Fluxo de saída – Agregado.
	Energia para mistura	43,76		kWh	A3	Electricity voltage transformation from high to medium voltage | electricity, medium voltage | Cutoff, U - BR-Southern grid.

A Tabela 31 foi elaborada com o objetivo de estabelecer a composição e a produção da emulsão asfáltica em usina. Para tal, a empresa GRECA Asfaltos foi contatada, pois forneceu as emulsões utilizadas neste estudo. Com base nos valores obtidos, foi possível inserir os dados na Tabela 30 e determinar os fluxos da BSM.

Tabela 31: Composição emulsão asfáltica

EQUIPAMENTO	QNT.	TEMPO [h]	POTÊNCIA [kW]	PRODUÇÃO HORÁRIA [ton]	EXECUÇÃO [ton]	ENERGIA [kWh]
Bomba CAP do moinho de emulsão	1	1,00	14,71			1,63
Moinho de cisalhamento	1	1,00	44,13			4,90
Bomba de fase aquosa	1	1,00	11,03	30,00	3,33	1,23
Motor vazo de pressão (compressor)	1	1,00	0,37			0,04
Agitador 1 dorna de fase aquosa	1	1,00	3,68			0,41
				CONSUMO ENERGÉTICO TOTAL:		8,21

Fonte: GRECA Asfaltos 10-2024

Fluxo X – BSM

A partir da contextualização apresentada no Item 2.5.1, entende-se que a BSM é o produto resultante da mistura de diferentes materiais com um ligante asfáltico. Para o caso deste trabalho, a BSM estudada é composta por fresado de rodovias experimentais (RAP), adição de agregado virgem, ligante asfáltico na forma de emulsão e adição de cimento Portland. A Tabela 32 apresenta o traço da BSM descrita.

Tabela 32: Traço da BSM

Material	Quantidade (%, t)
Agregado	65,66
Fresado/RAP	31,36
Cimento	0,98
Emulsão	2

Devido ao fato de a análise ser realizada para uma quantidade total de 100 toneladas de BSM, os valores apresentados na Tabela 32 são expressos tanto em porcentagem, quanto em toneladas. Sendo assim, estes valores indicam as quantidades exatas que devem ser produzidas de cada material para resultar na quantidade de BSM determinada.

Para a mistura dos quatro materiais é necessário o dispêndio de energia elétrica através de uma planta de usina misturadora. Para o cálculo da energia consumida, a concessionária Ecosul forneceu a listagem dos equipamentos e suas respectivas potências para a produção de 100 toneladas de BSM em uma hora. A Tabela 33 apresenta um resumo destes equipamentos, com o respectivo cálculo de energia elétrica consumida em kWh.

Tabela 33: Gasto energético da mistura da BSM

Equipamento	Qnt.	Tempo, h	Potência, kW	Produção horária, ton.	Execução, ton.	Energia, kWh
Motores da transportadora horizontal.	3	1	1,1	100	100	3,31
Motores da transportadora vertical.	2	1	5,52			11,03
Motores do misturador.	2	1	14,71			29,42
			Consumo energético total, kWh:			43,76

Fonte: ECOSUL 10-2024

Fluxo 1 – RAP

Os processos realizados para a produção do RAP envolvem o transporte da fresadora, com o auxílio de um caminhão, até o local das pistas experimentais, a distância percorrida pela fresadora sobre a pista experimental durante a fresagem, a distância percorrida pelo caminhão basculante para transporte do material fresado e a energia dispendida pela fresadora para realizar o trabalho de fresagem.

As pistas experimentais distam 50 km da usina onde ficam armazenados os caminhões, a fresadora e o RAP produzido em campo. A função "*Transport, freight, lorry* 16-32 *metric* ton, EURO5"do Ecoinvent exige a entrada da massa, em toneladas, do material transportado e a distância de transporte. Vale ressaltar que para a distância informada, a função considera que o caminhão percorreu este trajeto completamente vazio (ida até o local) e voltou carregando a massa especificada, com a produção de dióxido de carbono conforme código EURO 5 exigido no Brasil.

Desta forma, sabendo que o caminhão, que faz o transporte do fresado, parte vazio da usina, coleta a quantidade de fresado necessária para a produção de 100 toneladas de BSM, e retorna para a usina com esta massa, os valores de entrada, conforme destacados na Tabela 30, são equivalentes a 31,36 toneladas em 50 km.

Para o caso do caminhão que transporta a fresadora, ele parte da usina carregando a fresadora de 14 toneladas, e retorna ao ponto inicial com a mesma carga. Devido ao fato de a função considerar uma ida vazia e uma volta cheia, neste trabalho optou-se por considerar o dobro da distância (100 km), simulando a distância de ida mais volta com a carga especificada. Essa decisão vai a favor da segurança, visto que ela considera que o caminhão também percorreu os mesmos 100 km sem carga. Esta decisão foi tomada a partir do consenso de que, ao contabilizar os impactos ambientais, é mais adequado incluir um gasto energético extra no lugar de deixar de lado parte da fonte poluidora.

A distância percorrida pela fresadora depende de sua capacidade de fresagem e da quantidade de fresado necessária. Neste caso, o equipamento consegue realizar a fresagem em uma faixa de 1,00 metro de largura com profundidade de 20 cm. Assim, baseado na distância percorrida, calcula-se o volume de fresado obtido. A partir da massa específica do material fresado, equivalente a 2069 kg/m³, é possível converter o volume para massa, em toneladas. Em posse destes parâmetros, e sabendo-se que são necessárias 31,36 toneladas de RAP para a produção de 100 toneladas de BSM, a equação abaixo permite calcular a distância que a fresadora deve percorrer para obter a quantidade especificada:

$$d_f = \frac{m_f}{l \times e \times \gamma_f \times 1000} \tag{2}$$

Onde:

d_f: distância de fresagem [km];

m_f: massa de fresado desejada [kg];

γ_f: massa específica do fresado [kg/m³];

l: largura de fresagem [m];

e: espessura de fresagem [m];

Considerando os valores informados no parágrafo anterior, a distância de fresagem para a obtenção de 31,36 toneladas de RAP é de 0,076 km. Com relação à carga transportada, devemos considerar que a fresadora inicia o trajeto completamente vazia, e vai sendo carregada linearmente até o final da distância de 76 metros, onde estará com o total das 31,36 toneladas de RAP. Sendo assim, considerar o valor de 31,36 toneladas para todo o percurso resultaria em um valor superestimado de gasto energético, visto que o software permite somente a entrada de um valor não variável ao longo da distância. Portanto, optou-se por considerar a massa de transporte como metade da massa total (15,68 toneladas), visto que será considerada uma carga superior a real em 50% do trajeto e inferior nos demais 50%, em mesma proporção, havendo assim uma compensação.

Por fim, para o cálculo do consumo energético da operação de fresagem, foram utilizadas as informações fornecidas pelo DNIT no Sistema de Custos Referenciais de Obras (SICRO). A composição escolhida possui o código 4011479, denominada de "Fresagem contínua de revestimento asfáltico", referente ao estado do Rio Grande do Sul para o mês de abril de 2023. A Tabela 34 apresenta os equipamentos indicados pelo SICRO, com seu respectivo cálculo de consumo energético em kWh.

Tabela 34: Gasto energético para Fresagem contínua de revestimento asfáltico

Equipamento	Qnt.	Tempo, h	Potência, kW	Produção horária, m³	Execução, m³	Energia, kWh
Caminhão tanque com capacidade de 10.000 litros.	1	0,55	188	99,6	15,16	15,74
Fresadora a frio.	1	1	410			62,39
Mini carregadeira de pneus com vassoura de 1,8 metros.	2	0,83	45,5			11,49
Soprador de ar costal.	2	1	2,6			0,79
					Consumo energético total, kWh:	90,41

Fonte: SICRO – abril de 2023, adaptado pelo autor.

Destaca-se que a produção horária do SICRO é fornecida em m³ de material fresado, logo, houve a necessidade de converter as 31,36 toneladas de RAP para seu respectivo volume, equivalente a 15,16 m³, a partir de sua massa específica de 2069 kg/m³.

Fluxo 2 – Cimento

O fluxo relativo à produção de cimento apresenta a menor complexidade dos fluxos trabalhados neste estudo. Porém, espera-se que este seja o fluxo responsável pelos maiores impactos ambientais de produção da BSM, visto que a produção de cimento exige uma grande quantidade de horas de funcionamento de fornalhas, havendo uma enorme produção de gás carbônico, além do excessivo consumo de água demandado.

O cimento utilizado é do tipo composto com adição de filler (CP II-F), que apresenta teores de calcário entre 6% e 10%. A base de dados Ecoinvent já possui uma função específica que contabiliza os impactos de produção deste cimento, denominada de "cement production, limestone 6-10%", a qual foi utilizada para este fim.

Adicionalmente, considerou-se o impacto de transporte da fábrica de cimento até a usina de processamento da BSM. De acordo com a Tabela 32 é necessária 0,98 tonelada de cimento para a produção de 100 toneladas de BSM, a qual deve ser transportada por uma distância de 250 km.

Fluxo 3 – Emulsão

A emulsão asfáltica utilizada no projeto é composta de 60% de ligante asfáltico e 40% água. Destaca-se que a quantidade de água utilizada será completamente evaporada nas etapas subsequentes, portanto, não deve ser contabilizada na massa total de BSM produzida, sendo considerado apenas a massa de ligante. Sendo assim, de acordo com a Tabela 32, são necessárias 2 toneladas de ligante asfáltico para a produção da quantidade especificada de BSM. A produção do ligante é inserida no software a partir da função "*Pitch production, petroleum refinery operation*" do Ecoinvent.

Sabendo-se a proporção água/ligante da emulsão, e da necessidade de utilização de 2 toneladas de ligante, é possível determinar a quantidade de água necessária, equivalente a 1,33 tonelada. De maneira simplificada, considerou-se o uso de água de torneira, visto que era a única função disponível relacionada ao consumo de água na base de dados, equivalente a "*tap water production, conventional treatment*".

Com relação ao dispêndio energético para a mistura da emulsão, a empresa GRECA Asfaltos forneceu a relação de equipamentos, e suas respectivas potências, para tanques com capacidade horária de mistura de 30 toneladas. O resumo dos equipamentos e o cálculo energético para a mistura da emulsão estão apresentados na Tabela 35.

Tabela 35 – Gasto energético para mistura da emulsão asfáltica.

Equipamento	Qnt.	Tempo, h	Potência, kW	Produção horária, ton	Execução, ton	Energia, kWh
Bomba CAP do moinho de emulsão.	1	1,00	14,71	30,00	3,33	1,63
Moinho cisalhante.	1	1,00	44,13			4,90
Bomba de fase aquosa.	1	1,00	11,03			1,23
Motor vazo de pressão (compressor).	1	1,00	0,37			0,04
Agitador 1 dorna de fase aquosa.	1	1,00	3,68			0,41
					Consumo energético total, kWh:	8,21

Fonte: GREGA Asfaltos – outubro de 2023, adaptado pelo autor.

Por fim, foi considerado o transporte da emulsão partindo da refinaria até a usina de processamento da BSM. A distância é equivalente a 280 km, e a massa transportada a 3,33 toneladas, visto que a água ainda está presente na fase de transporte.

Fluxo 4 – Agregado

O último material a ser adicionado na mistura da BSM é o agregado virgem. Seus impactos ambientais estão relacionados apenas a sua produção (britagem) e ao seu transporte. O Ecoinvent possui uma função específica para contabilizar os impactos da britagem, denominada de "*gravel production, crushed"*.

O transporte utilizado foi considerado unitário, visto que a pedreira de extração do agregado está localizada dentro da usina de produção de BSM. Sendo assim, considerou-se o transporte de 65,66 toneladas, conforme indicado pela Tabela 32, por uma distância unitária de 1 km.

4.5.2.3.3 Avaliação dos impactos

Os impactos ambientais apresentados correspondem à produção de 100 toneladas de BSM (unidade declarada), determinados através do método de avaliação de impacto ReCiPe (versão 1.13), considerando as abordagens Midpoint (I((Individualista, curto prazo de interesse - em geral 20 anos)) e Endpoint (E, A(Igualitária, longo prazo, 500 anos, 1000 anos, infinito, dependendo da categoria de impacto));

ReCiPe Midpoint (I)

A **Erro! Autoreferência de indicador não válida.**apresenta os resultados obtidos para cada categoria do método de avaliação de impacto ReCiPe na abordagem Midpoint, e suas respectivas unidades de referência.

Tabela 36 – Impactos por categoria – ReCiPe Midpoint (I).

Categoria de Impacto	Resultado	Unidade
Ocupação de terras agrícolas - ALOP	55,14	m2a
Mudanças climáticas - GWP20	2405,99	kg CO2-Eq
Esgotamento de combustíveis fósseis - FDP	1832,06	kg oil-Eq
Ecotoxicidade de água doce - FETP100	6,84	kg 1,4-DCB-Eq
Eutrofização de água doce - FEP	0,13	kg P-Eq
Toxicidade humana - HTP100	146,74	kg 1,4-DCB-Eq
Radiação ionizante - IRP_I	46,53	kg U235-Eq
Ecotoxicidade marinha - METP100	5,50	kg 1,4-DCB-Eq
Eutrofização marinha - MEP	6,77	kg N-Eq
Esgotamento de metais - MDP	63,87	kg Fe-Eq
Transformação natural de terras - NLTP	1,98	m2
Depleção de ozônio - ODPinf	0,00	kg CFC-11-Eq
Formação de material particulado - PMFP	6,85	kg PM10-Eq

Categoria de Impacto	Resultado	Unidade
Formação de oxidante fotoquímico - POFP	21,31	kg NMVOC
Acidificação terrestre - TAP20	16,28	kg SO2-Eq
Ecotoxicidade terrestre - TETP100	0,43	kg 1,4-DCB-Eq
Ocupação urbana de terras - ULOP	59,74	m2a
Depleção de água - WDP	4,72	m3

Fonte: OpenLCA – Ecoinvent, adaptado pelo autor.

Os resultados da tabela anterior podem ser subdivididos em cada um dos módulos de análise da ISO 21930 (ISO, 2017), estando estes resultados expostos na

Tabela **37**, sendo A1 correspondente à produção de matéria-prima, A2 ao transporte da matéria-prima e A3 à energia utilizada para a geração do produto a partir da matéria-prima.

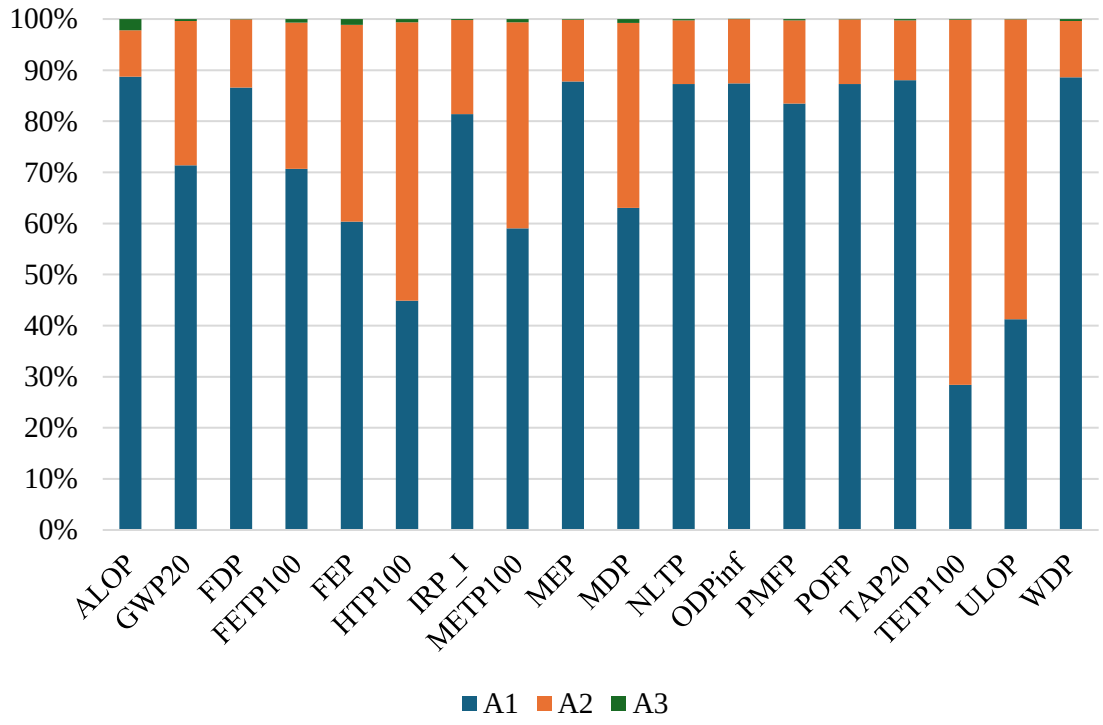
Tabela 37 – Impactos por módulo de análise – ReCiPe Midpoint (I).

Categoria de Impacto	A1	A2	A3	Unidade
ALOP	48,91	5,01	1,22	m^2a
GWP20	1717,09	680,33	8,57	kg CO_2-Eq
FDP	1586,08	244,89	1,10	kg oil-Eq
FETP100	4,84	1,96	0,05	kg 1,4-DCB-Eq
FEP	0,08	0,05	0,00	kg P-Eq
HTP100	65,86	79,97	0,91	kg 1,4-DCB-Eq
IRP_I	37,86	8,57	0,09	kg U235-Eq
METP100	3,25	2,22	0,04	kg 1,4-DCB-Eq
MEP	5,94	0,82	0,01	kg N-Eq
MDP	40,27	23,11	0,48	kg Fe-Eq
NLTP	1,73	0,25	0,00	m2
ODPinf	0,00	0,00	0,00	kg CFC-11-Eq
PMFP	5,71	1,12	0,02	kg PM10-Eq

Categoria de Impacto	A1	A2	A3	Unidade
POFP	18,60	2,70	0,02	kg NMVOC
TAP20	14,33	1,91	0,04	kg SO2-Eq
TETP100	0,12	0,31	0,00	kg 1,4-DCB-Eq
ULOP	24,65	35,05	0,04	m^2a
WDP	4,18	0,52	0,02	m^3

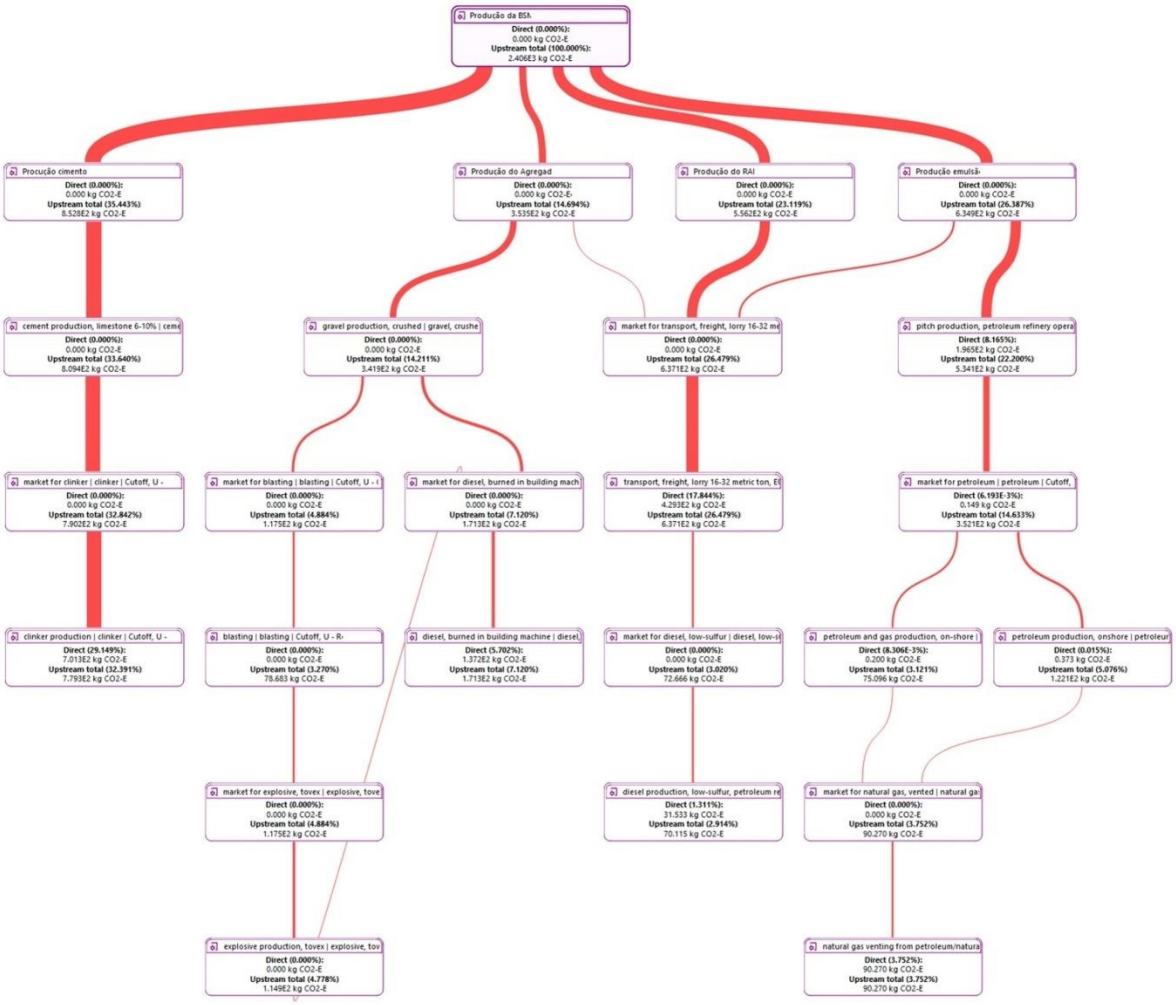
De forma a facilitar a interpretação da Tabela 37, foi gerada a Figura 181 que apresenta um gráfico de barras empilhadas com a porcentagem proveniente de cada módulo de análise em cada uma das categorias de impacto analisadas.

Figura 181 – Impactos por módulo de análise – ReCiPe Midpoint (I).



A Figura 182 apresenta o fluxograma esquemático dos impactos que provocam mudanças climáticas, medidos em quantidade de CO_2 gerado na produção da BSM. Linhas vermelhas de maior espessura indicam os subprocessos que mais colaboraram para as emissões deste gás.

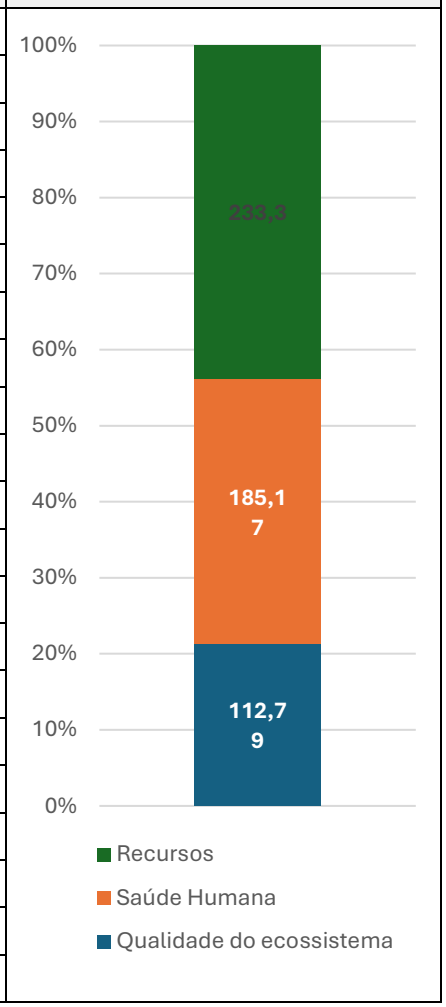
Figura 182 – Fluxograma de impacto nas mudanças climáticas.



ReCiPe Endpoint (E, A)

A Tabela 38 apresenta a pontuação para cada categoria considerada na abordagem *Endpoint* do método de avaliação de impacto ReCiPe A última coluna da Tabela 38 apresenta o gráfico de barras acumuladas dos impactos por grupo analisado.

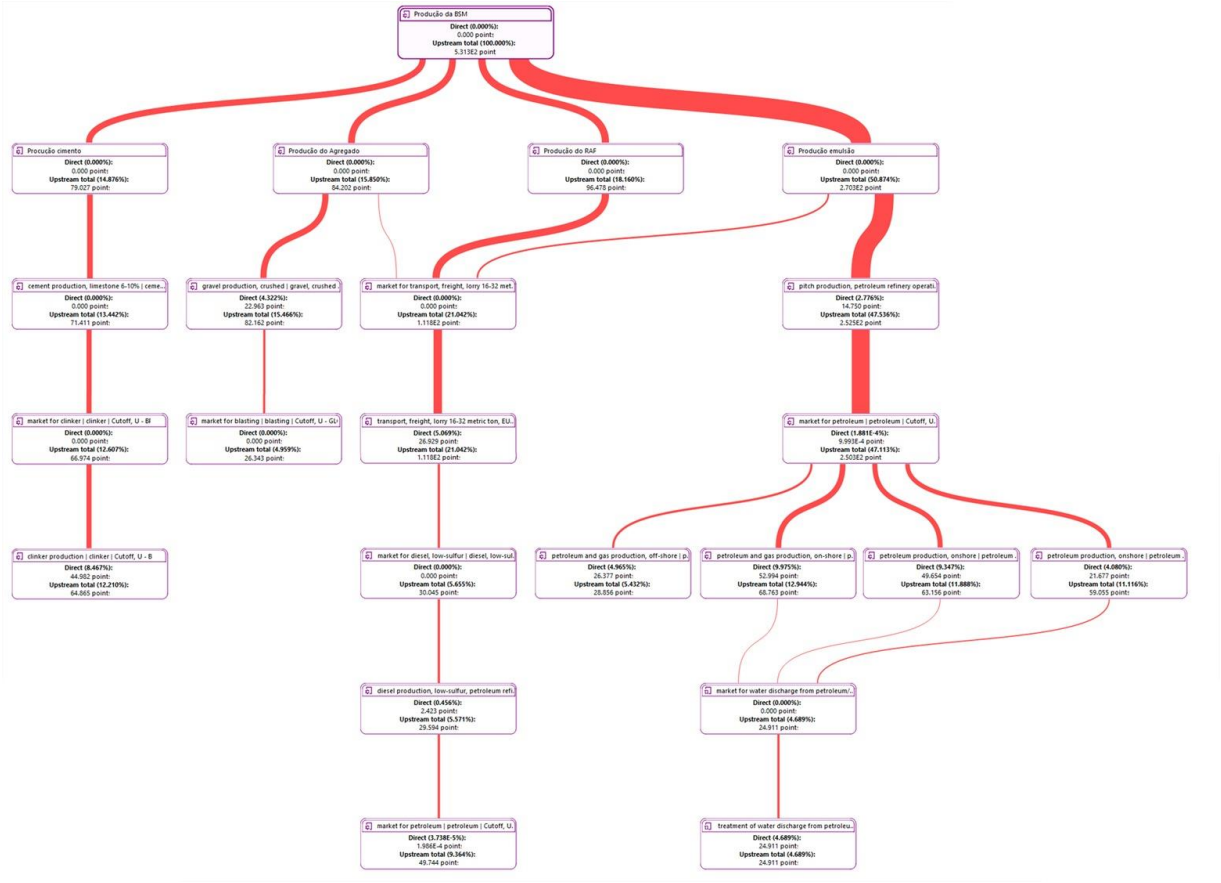
Tabela 38 – Impactos por categoria – ReCiPe Endpoint (E, A).

Grupo	Categoria de Impacto	Pontos	Gráfico
Qualidade do ecossistema	Ocupação de terras agrícolas	1,41	
	Mudanças climáticas, ecossistemas	59,54	
	Ecotoxicidade de água doce	0,01	
	Eutrofização de água doce	0,01	
	Ecotoxicidade marinha	2,53	
	Transformação natural de terras	45,98	
	Acidificação terrestre	0,44	
	Ecotoxicidade terrestre	1,07	
	Ocupação urbana de terras	1,80	
	Total	112,79	
Saúde humana	Mudanças climáticas, saúde humana	74,91	
	Toxicidade humana	92,67	
	Radiação ionizante	0,05	
	Depleção de ozônio	0,02	
	Formação de material particulado	17,36	
	Formação de oxidante fotoquímico	0,14	
	Total	185,17	
Recursos	Esgotamento de combustíveis fósseis	219,70	
	Esgotamento de metais	13,60	
	Total	233,30	
	Total:	531,25	

Fonte: OpenLCA – Ecoinvent, adaptado pelo autor.

A Figura 183 apresenta o fluxograma esquemático das pontuações totais de impacto ambiental obtidas em cada etapa de produção da BSM. Linhas vermelhas de maior espessura indicam pontuações mais elevadas e, por consequência, maiores impactos considerando a qualidade do ecossistema, saúde humana e recursos.

Figura 183 – Fluxograma de impactos totais na análise de *endpoint*.



4.5.2.3.3 Interpretação dos impactos

Os impactos geradores de mudanças climáticas foram estimados para um período de 20 anos e result aram, de acordo com a do método de avaliação de impacto ReCiPe na abordagem Midpoint, e suas respectivas unidades de referência na Tabela 36, em uma geração de 2406 kg de CO_2 equivalente. Este valor é distribuído em 1717,09 kg, 680,33 kg e 8,57 kg respectivamente para os módulos de análise A1, A2 e A3, conforme observado na

Tabela **37**. Assim, fica evidente que a etapa relativa à produção de matéria-prima (A1) é a responsável pela maior parte da produção de CO_2, correspondente a 71,4% do total emitido.

Ademais, a partir da Figura 182, é possível verificar que o cimento Portland é o maior responsável pela geração de CO_2, seguido pela produção de emulsão asfáltica e RAP, mais uma vez

corroborando a conclusão anterior de que a fase de produção de matéria-prima (A1) é a fase de maior impacto do escopo analisado.

Ainda com relação aos módulos de análise, a Figura 181 evidencia que a fase de produção da matéria-prima é o principal impactante não somente na produção de CO_2, como também na maioria das categorias de impactos analisados, sendo o módulo de transporte o maior impactante apenas nas categorias de toxicidade humana e ecotoxicidade terrestre, devido nitidamente à queima de combustível fóssil. Também, é notório o baixo impacto gerado pelo módulo de produção final da mistura (A3), insignificante ao ser comparado com demais, visto que esta etapa contabiliza apenas a energia necessária para a mistura final de todos os materiais produzidos anteriormente.

A partir da análise de endpoint, com o auxílio do gráfico da Tabela 38, verifica-se o grupo mais impactado são os recursos naturais, principalmente relativo ao esgotamento de combustíveis fósseis. Isto ocorre, pois a maioria das atividades realizadas (transporte, mistura e fresagem) utilizam combustível fóssil como fonte de energia.

Na sequência, o segundo grupo mais impactado é a saúde humana, devido principalmente à toxicidade, mudanças climáticas e materiais particulados. Todos esses fatores também estão relacionados direta ou indiretamente com a produção de CO_2, gerada pela queima dos combustíveis fósseis que, como visto no parágrafo anterior, é o fator de maior impacto nos recursos naturais.

O grupo menos impactado é a qualidade do ecossistema, mas que ainda corresponde a uma parcela significativa, com uma pontuação superior a 50% da do grupo anterior. As principais categorias de impacto deste grupo são as mudanças climáticas e a transformação natural de terras. Novamente as mudanças climáticas estão ligadas à produção de CO_2, conforme discutido nesta seção. Para além disso, os impactos da transformação natural de terras são provenientes principalmente da exploração de pedreiras e petróleo, verificadas em diversas etapas da produção da mistura.

Por fim, a Figura 183, considerando os impactos totais convertidos para pontos, indica que a produção da emulsão é a etapa mais prejudicial do processo, visto que sua pontuação supera em mais de duas vezes a pontuação da segunda etapa de maior impacto (produção do RAP). Isso ocorre devido ao uso de ligante asfáltico, o qual é um subproduto do refinamento do petróleo.

4.5.3 ELBABORAÇÃO DE MINUTA DE NORMA

O presente RDT tem como objetivo, ao final de seu desenvolvimento, trazer princípios para delimitar junto ao DNIT/IPR delimitem um escopo para a proposta de norma ou instrução de serviço, com vistas a incorporar as melhores práticas no uso dos materiais estudados na pesquisa. Esses materiais incluem base asfáltica de elevado módulo e/ou misturas de RAP (Reclaimed Asphalt Pavement) combinadas com agregado virgem, cimento Portland e emulsão asfáltica.

Para alcançar esse objetivo, foram iniciadas discussões no grupo de trabalho do Laboratório de Pavimentação (LAPAV), em conjunto com os engenheiros da ECOSUL/ECORODOVIAS. Essas discussões têm como finalidade delimitar os trabalhos necessários e desenvolver uma norma que possa atender de forma eficaz às necessidades da sociedade e do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT).

Além dos resultados dos ensaios apresentados tanto neste quanto nos relatórios anteriores, este documento incluirá novos conceitos que serão explorados com maior profundidade no relatório final, previsto para ser apresentado no próximo semestre. Esses conceitos buscam complementar as informações já disponíveis e fornece uma base sólida para a elaboração da norma.

4.5.3.1 Normas nacionais e internacionais sobre Materiais estabilizados

A confecção da norma buscou em um primeiro momento revisar na literatura, normas nacionais, internacionais e procedimentos sobre bases estabilizadas com emulsão asfáltica e normativas sobre reciclagem de pavimentos a frio (*Cold recycling pavement*), bases estabilizadas com emulsão (BSM – *Bitumen Stabilised Materials*), materiais estabilizados com materiais asfálticos, reciclagem profunda (FDR - *Full-depth reclamation*).

A primeira referência para isso é o manual desenvolvido na República da África do Sul, ao qual embasou a parte de ensaios laboratoriais do presente RDT "*Technical Guideline: Bitumen Stabilised Materials – TG2"* (SABITA, 2020), apresenta todas as recomendações desde procedimentos de ensaios para dosagem, execução e dimensionamento de pavimentos que utilizem Materiais Estabilizados com asfalto (BSM - *Bitumen Stabilised Materials*). A versão de 2020, é um

aprimoramento da versão de 2009, onde mudanças como a moldagem de corpos de prova antes realizada tanto pelo método marshall e vibratório passa a ser somente realizada pelo método vibratório (Asphalt Academy, 2009). Também, a mudanças nas dimensões dos corpos de prova devido ao método de compactação. Assim, em muitos artigos e pesquisas consideram a utilização do método marshall citando o guia TG2, contudo com a atualização, o mesmo deixou de ser utilizado.

A Wirtgen, empresa alemã que fornece soluções e equipamentos para reciclagem de pavimentos, desenvolveu um manual intitulado "*Wirtgen Cold Recycling Technology*" (Tecnologia de reciclagem a frio) (Wirtgen, 2012). Esse manual apresenta soluções e parâmetros extremamente parecidos com o que se utiliza no TG2 versões de 2009 e 2020.

A nível Americano, a Asphalt Recycling & Reclaiming Association (ARRA) desenvolveu procedimentos de reciclagem de pavimentos considerando parâmetros como "*CR201 – Recommended Mix Design Guidelines For Cold Recycling Using Bituminous Recycling Agents*" (Recommended Mix Design Guidelines For Cold Recycling Using Emulsified Asphalt Recycling Agent CR201ARRA, 2023), "*CR102 – Recommended Construction Guidelines For Cold Central Plant Recycling (CCPR) Using Bituminous Recycling Agents*" (Recommended Construction Guidelines For Cold Central Plant Recycling (CCPR) Using Bituminous Recycling Agents CR102ARRA, 2023), "*FDR101 – Recommended Construction Guidelines For Full Depth Reclamation (FDR) Using Bituminous Stabilization*" (Recommended Construction Guidelines For Full Depth Reclamation (FDR) Using Bituminous Stabilization FDR101ARRA, 2017), "*FDR201A – Recommended Mix Design Guidelines For Full Depth Reclamation (FDR) Using Emulsified Asphalt Stabilizing Agent*" (Recommended Mix Design Guidelines For Full Depth Reclamation (FDR) Using Emulsified Asphalt Stabilizing Agent FDR201AARRA, 2023). Esses procedimentos servem tanto como base para a construção e projeto de mistura e dosagem de materiais reciclados com emulsão asfáltica.

A nível nacional, relacionado diretamente à materiais estabilizados com emulsão, não há nenhuma normativa ou guia. O livro Pavimento Sustentável (Bonfim, 2021) apresenta aspectos sobre reciclagem de pavimentos, contudo o enfoque maior está em mistura com espuma de asfalto.

Referente à normatização nacional, o DNIT apresenta Especificações de Serviço (ES) para reciclagem de pavimentos in situ e usina com espuma de asfalto e cimento, ficando de fora a reciclagem com emulsão asfáltica. As referidas normas DNIT são:

- DNIT 166/2013 - Pavimentação - Reciclagem de pavimento a frio "in situ" com adição de espuma de asfalto (DNIT, 2013).
- DNIT 169/2014-ES - Pavimentação - Reciclagem de pavimento em usina com espuma de asfalto - Especificação de serviço (DNIT, 2014)
- DNIT 167/2013-ES – Pavimentação – Reciclagem profunda de pavimentos in situ com adição de cimento Portland – Especificação de Serviço (DNIT, 2013b).

Estas normas apresentam somente parâmetros de especificação de serviço, fixando as condições a serem adotadas na execução e controle de reciclagem a frio de materiais de pavimentação. No caso da Especificação de Serviço 166/2013 (DNIT, 2013) e Especificação de Serviço 169/2014 (DNIT, 2014) a camada reciclada é obtida utilizando-se espuma de asfalto e cimento Portland, algo semelhante ao desenvolvido no presente RDT, contudo aqui utilizou-se emulsão asfáltica. Já a norma especificação de serviço 167/2014 (DNIT, 2014) utiliza-se somente do cimento como material de aglutinação para a composição da mistura.

Estas normas serão utilizadas como parâmetros para montar os procedimentos de minuta para a nova norma focada em emulsão asfáltica.

As ES 166/2013 e ES 169/2014 também apresentam que as misturas recicladas devem obedecer a uma faixa granulométrica característica, conforme a Tabela 39, sendo que a composição final deve satisfazer aos requisitos do projeto apresentar o valor mínimo de 0,25 MPa para a resistência à tração indireta seca e de 0,15 MPa para a resistência à tração indireta saturada, a 25 °C.

Tabela 39: Composição granulométrica

Peneiras de malha quadra		Percentagem passando, em massa (%)	Tolerância da faixa de projeto (%)
ABNT	Aberturas (mm)		
2"	50,800	100	-7
1 1/2	38,100	88 - 100	± 7
1"	25,400	75 - 10	± 7
3/4"	19,100	66 - 99	± 7
1/2"	12,700	55 - 87	± 7
3/8"	9,500	49 -74	± 7
1/4"	6,300	40 - 62	± 7
N° 4	4,750	35 - 56	± 5
N° 8	2,360	25 - 42	± 5
N° 16	1,180	18 - 33	± 5
N° 30	0,060	14 - 28	± 5
N° 40	1,425	12 -26	± 5
N° 50	0,300	10 -24	± 5
N° 100	1,150	7 -17	± 2
N° 200	0,075	5 -20	± 2

Fonte: (DNIT, 2013a)

Entretanto a normativa não especifica métodos ou referencias para procedimentos de dosagem, tamanhos de corpos de prova ou demais especificações para a obtenção destes valores. Referente aos processos de execução, por serem normas para aplicação in situ e em usina, algumas diferenças são encontradas.

A utilização in situ facilita os processos, pois por ser diretamente em campo não há necessidade de transporte do material, entretanto a mistura pode tornar-se mais variável, do que quando processada em usina, onde tem-se um melhor controle.

4.5.3.2 Parâmetros de avaliação de misturas

A avaliação e dosagem de misturas recicladas passa por diferentes procedimentos quando avaliado a experiencia nacional e internacional. Assim, de maneira a facilitar o comparativo, montou-se uma tabela, comparando as normativas e estudos que utilizam materiais estabilizados com emulsão ou materiais reciclados com emulsão asfáltica. Esta tabela ainda está em constante atualização e busca a inserção de parâmetros que possam auxiliar na execução da minuta de norma, servindo como base teórica para isso. Ressalta-se que a emulsão asfáltica é o enfoque do estudo, apresentado diferenças significativas na questão da utilização quando comparada com espuma de asfalto, entretanto, parâmetros de dosagem e comportamento do material após a cura é semelhante. A tabela encontra-se no ANEXO IX do presente relatório devido ao seu formato.
A tabela dividiu-se em Identificação, parâmetros de dosagem e desempenho. De forma a resumir a tabela apresentada no ANEXO IX, a Figura 184, apresenta um resumo dos tipos de compactação, parâmetros de dosagem, tamanhos de corpos de prova, tipos de cura e ensaios adicionais de desempenho que os diferentes procedimentos apresentam.

Figura 184: Parâmetros utilizados por BSM's

Compactação:	Parâmetros de dosagem:	Tamanho dos CP's	Cura:	Ensaios Adicionais:
- vibratório - giratório - giratório Locking Point - marshall	- ITS seco e úmido - Estabilidade - Fluência	- ø150 x 95 mm - ø150 x 75 mm - ø100 x 63,5±1,3mm	- 72h em estufa a 40°C +24h a 25°C; - 16 a 48h em estufa a 60° + 12 a 24h a 25°C.	- DUI - DP - RT - Triaxial MR - Triaxial Monotônico

Dentre os métodos apresentados, os mais recomendados, são a dosagem utilizando a compactação vibratório, com paramentos e resistência a tração indireta (ITS) em corpos de prova cilíndrico de no mínimo 150mm de diâmetro (SABITA, 2020). Estas escolhas também se baseiam no tipo de material utilizado, ter um comportamento granular estabilizado e devido ao tamanho das partículas utilizadas, não comportando a sua compactação com dimensões menores que 150mm.

4.5.4 WORKSHOP

Ao longo do primeiro semestre de 2024, correspondente ao período do terceiro relatório parcial, iniciou-se as preparações do Workshop exclusivo para a divulgação da técnica de utilização de materiais estabilizados com emulsão asfáltico, bem como a discussão da proposição de minuta de norma ou especificação de serviço sobre o tema.

Dentro das proposições do presente RDT, o desenvolvimento da minuta de norma deve ocorrer de maneira conjunta entre a comunidade acadêmica e o DNIT. Assim, ao longo do segundo semestre de 2024 e correspondente ao último período do RDT, será desenvolvido trabalhos para avaliação e discussão da minuta.

Entretanto, já nesse semestre, iniciou-se o desenvolvimento do Workshop, definindo-se datas e local para a realização do evento. A primeira reunião com ata apresentada no ANEXO X, traz os principais tópicos abordados. Definiu-se que o evento será realizado na cidade de Pelotas/RS no mês de setembro em conjunto com o II Seminário de Engenharia Rodoviária, promovido pela ECOSUL.

Dentro do Workshop, duas frentes de trabalho deverão ser desenvolvidas. Em um primeiro momento, deve-se apresentar os resultados, sugestões e padrões, com grupos de trabalhos, com especialistas na área em reuniões para discussões. E em um segundo momento, mesas redonda e apresentação de resultados para a comunidade, para discussão da utilização de Materiais estabilizados com emulsão.

Além disso, reuniões paralelas, dentro do presente semestre, ocorreram com a ECORODOVIAS, para discussão dos resultados, proposições e melhorias para a utilização da técnica. Somado a isso, deve-se realizar reuniões com o DNIT para apresentação dos dados obtidos até o presente momento, e elaborar um esboço da minuta de norma, de acordo com as prerrogativas do órgão.

4.5.5 PARTICIPAÇÃO EM CONGRESSOS E EVENTOS

No período correspondente ao terceiro relatório parcial janeiro a julho de 2024, ocorreu a participação no XXII *Congreso Ibero Latinoamericano del Asfalto*, entre 22 al 26 de abril de 2024

em Granada na Espanha. No presente congresso apresentou-se o artigo intitulado “IMPACTO DO TEMPO DE CURA NOS PARÂMETROS DE RESISTÊNCIA DE MISTURAS ESTABILIZADAS COM EMULSÃO ASFÁLTICA TIPO BSM”. O ANEXO XI apresenta uma cópia do artigo submetido ao congresso, que, até no momento da elaboração do relatório parcial 2, ainda não havia sido publicado. A Figura 185 ilustra o Professor Lélio Brito que apresentou o artigo no evento.

Figura 185: Apresentação do Artigo - CILA



4.6 Quadro Resumo – Atividades Previstas x Desenvolvidas

Atividades Previstas	**Produtos Esperados**	**Atividades Executadas**	**Status das Atividades Executadas**	**Produtos Gerados**
Etapa de Campo	-Relatório	Etapa de Campo	Concluídas	- Relatório
Análise de dados	- Relatório	Etapa Análise de dados	Concluídas conforme o previsto para o período	- Relatório -Artigo científico
Minuta, Norma ou instrução de Serviço	- Relatório	Minuta, Norma ou instrução de Serviço	Concluídas conforme o previsto para o período	- Relatório
Elaboração de relatórios	- Relatório	Elaboração de relatórios	Concluídas conforme o previsto para o período	- Relatório
Workshop	- Evento de divulgação - Relatório	Workshop	Concluídas conforme o previsto para o período	- Relatório

4.7 Atividades Previstas para o Próximo Período (01/07/2024 a 31/12/2024)

Na sequência são listas as atividades previstas para serem realizadas no período que compreende o quarto semestre do projeto "Estudo de compósitos de cimento, emulsão com fresado asfáltico e agregados virgens para bases de elevado desempenho".

1. Análise de dados

2. Elaboração de relatórios
3. Minuta, Norma ou Instrução de Serviço
4. Workshop

5. QUARTO SEMESTRE DO PROJETO

5.1 Resumo

As atividades de execução do presente RDT tiveram início em janeiro de 2023. Este item do Relatório Final refere-se ao quarto semestre último semestre do Projeto, abrangendo o período entre julho de 2024 e dezembro de 2024. As atividades previstas no Plano de Trabalho foram desenvolvidas de acordo com o cronograma físico-financeiro estabelecido, concluindo todas as etapas previstas no mesmo.

5.2 Atividades previstas para o período

Para o período que contempla o quarto semestre do projeto "Estudo de compósitos de cimento, emulsão com fresado asfáltico e agregados virgens para bases de elevado desempenho" estavam previstas para realização as seguintes atividades:

1. Análise de dados
2. Minuta, norma ou instrução de serviço
3. Elaboração de relatórios
4. Workshop

5.3 ATIVIDADES EXECUTADAS NO PERÍODO

Para o período que contempla quarto semestre do projeto "Estudo de compósitos de cimento, emulsão com fresado asfáltico e agregados virgens para bases de elevado desempenho" foram executadas as seguintes atividades:

1. Análise de dados
2. Minuta, norma ou instrução de serviço

3. Elaboração de relatórios
4. Workshop

5.4 Justificativas

Todas as atividades previstas foram executadas.

5.5 Descrição das Atividades Desenvolvidas

O Quarto semestre do projeto " Estudo de compósitos de cimento, emulsão com fresado asfáltico e agregados virgens para bases de elevado desempenho ", compreendido entre os meses de julho a dezembro de 2024, transcorreu conforme o previsto no cronograma físico-financeiro. As atividades desenvolvidas incluíram a continuação e conclusão da etapa de análise de dados, elaboração de relatórios, Workshop e Minuta de Norma.

5.5.1 Etapa de análise de dados

5.5.1.1 Análise integrada rigidez & resistência da mistura tipo base negra & mistura com RAP+AV+CP+EM com análises mecanística não-lineares (AEMC e/ou software de FEM(e.g. EverFE)).

A análise de materiais estabilizados com emulsão do tipo BSM enfrenta desafios relacionados ao comportamento do material frente aos mecanismos de ruptura e à previsão de sua vida útil. A partir de modelos preditivos, é possível estimar o desempenho do material combinando parâmetros obtidos em laboratório com valores de campo. Essa abordagem permite a elaboração de cenários que avaliam a resistência do material à ação do tráfego.
O modelo utilizado no presente relatório considera parâmetros de laboratório e de campo para a determinação do número N, permitindo a avaliação do desempenho do material. Especificamente, o modelo de análise adotado para o comportamento das bases do tipo BSM fundamenta-se nos

critérios estabelecidos pelo TG2 (SABITA, 2020). Esse modelo integra dados laboratoriais, como coesão e ângulo de atrito, às tensões atuantes na camada avaliada, obtidas por meio de simulações realizadas em software especializado com o método AEMC.

Com base na equação (3), apresentado por Sabita (2020), consegue-se avaliar as correlações de desempenho em relatório em campo.

$$\log N = A - 57{,}286(DSR)^3 + 0{,}0009159(P_{MDD}.RetC) \quad (3)$$

Onde:

- N = Número de repetições de eixo para atingir uma profundidade de trilha definida
- A = Coeficiente de Confiabilidade associado à Categoria da Estrada, DSR = Relação de Tensão Desviadora, como uma fração
- PMDD = Densidade seca do BSM expressa como uma porcentagem da Densidade Máxima (% MDD)
- RetC = Coesão Retida (%)

Tabela 40: Coeficiente de confiabilidade associado a categoria de estrada

Confiabilidade	Categoria da Estrada	A	Limite de Trilha (mm)
95%	A	1,71113	10
90%	B	1,79873	15
80%	C	1,88733	20
50%	D	2,00443	25

Com auxílio da equação (4) e equação (5) determina-se a os demais parâmetros necessários para a obtenção da equação.

$$DSR = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_{1,F} - \sigma_3} \quad (4)$$

$$\sigma_{1,f} = \frac{(1 + \sin\emptyset) \times \sigma_3 + 2 \times C \times \cos\emptyset}{(1 - \sin\emptyset)} \quad (5)$$

Onde:

DSR = Relação de Tensão Desviadora expressa como uma fração

$\boldsymbol{\sigma_1}$ = Tensão principal maior na camada (kPa)

$\boldsymbol{\sigma_3}$ = Tensão principal menor na camada (kPa)

$\boldsymbol{\sigma_1,f}$ = Tensão principal maior na falha obtida em um ensaio triaxial (kPa)

C = Valor de coesão do BSM a partir do projeto da mistura (kPa)

Ø = Ângulo de atrito do BSM a partir do projeto da mistura

As tensões principais das camadas foram obtidas pelo software AEMC. Assim, para avaliar as estruturas, considerando os dados disponíveis de Modulo de resiliência de laboratório e de campo, bem como considerando os dados de laboratório de coesão, ângulo de atrito, módulo de resiliência triaxial, foi possível construir cenários de avaliação para a estrutura do km 495 da BR-116. A Figura 126, previamente apresentada no Item 4, apresenta a configuração estrutural considerada nas análises. Os cenários incluem simulações realizadas para a estrutura com dados de módulo obtidos em laboratório para o BSM, baseados no modelo composto descrito na equação (6), e módulos fixos para as demais camadas, conforme a literatura técnica.

Os cenários analisados consideram duas abordagens distintas: a primeira utiliza exclusivamente dados laboratoriais aplicados à estrutura apresentada na Figura 126; a segunda baseia-se em módulos retroanálisados para diferentes condições de carga. A equação (6) descreve o modelo composto desenvolvido para o material BSM, utilizado na análise considerando dados obtidos exclusivamente em laboratório e referências da literatura técnica.

$$MR = 4648 \times \sigma_3^{0,4} \times \sigma_d^{0,04} \quad (6)$$

Onde:

σ_3: tensão principal menor

σ_d: Tensão desvio

A **Tabela 41** e **Tabela 42** apresenta os valores de módulos retroanálisados, determinados por meio do software BackMeDiNa, para cargas de 2,7 t, 4,1 t, 5,4 t e 7,2 t. Esses dados oferecem suporte à avaliação estrutural da camada de BSM sob diferentes solicitações.

Tabela 41: Dados de MR retroanálisados para 2,7t e 4,1t

Camada	Espessura (mm)	2,7 t			4,1 t		
		out.23	jan.24	abr.24	out.23	jan.24	abr.24
Novo Concreto Asfáltico	50	2167	1520	1391	2482	1807	1311
BSM - EARP	130	1366	431	835	1235	709	832
Concreto Asfáltico Velho	60	1057	94	398	1043	121	127
Base de Solo	400	80	100	160	92	94	105
Subleito	0	619	268	281	296	239	227

Tabela 42: Dados de MR retroanálisados para 5,4t e 7,2t

Camada	Espessura (mm)	5,4 t			7,2 t		
		out.23	jan.24	abr.24	out.23	jan.24	abr.24
Novo Concreto Asfáltico	50	2843	644	4270	1900	1021	1290
BSM - EARP	130	1498	678	668	1523	779	693
Concreto Asfáltico Velho	60	597	261	167	1056	261	402
Base de Solo	400	70	92	78	64	85	88
Subleito	0	287	218	212	311	198	202

A análise mecanicista utilizando a teoria elástica de camadas determina as tensões principais maior e menor, σ1 e σ3. Estas são calculadas a uma profundidade de ¼ da espessura da camada BSM. Usando σ1 e σ3, além da coesão (C) e do ângulo de atrito (Ø) provenientes do projeto da mistura, Tabela 43, é calculada a razão de tensões desviadoras

Tabela 43: Dados material avaliado

BSM-RE-nE		Resultado
Máxima densidade Seca Proctor Modificado		2069 kg/m³
Teor de asfalto residual da emulsão		2,0%
Conteúdo de Filler ativo (Cimento)		1,0%
Resistência a tração Indireta	Seca	315,17 kPa
	Úmida	275,12 kPa
Triaxial Monotônico	Ângulo de Atrito (Ø)	39,4°
	Coesão (C)	320,63 kPa
	Coesão retida (RetC)	76%
Classificação BSM conforme TG2 (SABITA, 2024)		BSM 1

Assim, a Figura 186 apresenta valores de N_{AASTHO} (Número de Passagens Equivalentes AASTHO**)** calculados com base na fórmula TG2 e tensões extraídas do software AEMC, de módulos de laboratório e retroanálisados no software BackMeDiNa. Os valores foram registrados em diferentes meses e com diferentes variações de carga e sazonalidade. O primeiro valor corresponde aos valores de laboratório.

O valor de N_{AASTHO} para os dados de laboratório, em torno de 1,61E+08, é uma referência importante, pois reflete condições controladas, sem as influências externas presentes nos valores de campo. Já, os valores obtidos em campo apresentam oscilações consideráveis entre os meses (out/23, jan/24 e abr/24), o que sugere forte influência da sazonalidade (mudanças de temperatura, umidade) e das variações de carga no desempenho do pavimento.

Quando se avalia os grupos de dados:

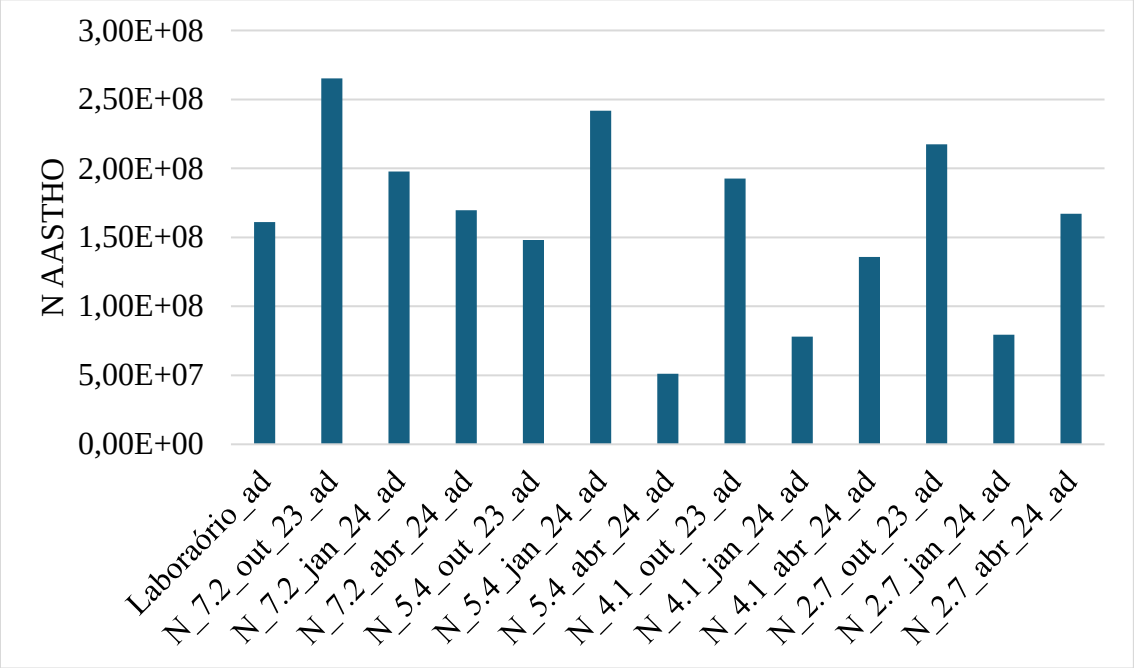
- Grupo N_7.2t (2,65E+08 → 1,70E+08): Há uma queda progressiva nos valores de N ao longo dos meses. Em outubro/23, o valor foi o mais alto (2,65E+08), mas apresentou redução significativa até abril/24 (1,70E+08). Possível explicação: Sazonalidade e deterioração progressiva devido ao aumento das tensões principais e repetição de cargas.
- Grupo N_5.4 t (1,48E+08 → 5,11E+07): Observa-se uma redução acentuada em abril/24 (5,11E+07) em comparação com outubro/23 (1,48E+08) e janeiro/24 (2,42E+08). Possível explicação: Este comportamento pode indicar uma combinação crítica de carga e variações sazonais, que resultou em um desempenho estrutural muito mais baixo em abril.
- Grupo N_4.1 t (1,93E+08 → 1,36E+08): Valores de N em outubro/23 (1,93E+08) e abril/24 (1,36E+08) mostram oscilações moderadas, mas há uma queda relevante em janeiro/24 (7,80E+07). Possível explicação: A queda em janeiro pode estar associada a variações sazonais extremas (como temperaturas mais baixas), que podem influenciar diretamente o comportamento mecânico do pavimento.
- Grupo N_2.7 t (2,17E+08 → 1,67E+08): A tendência é semelhante ao grupo anterior, com uma queda acentuada em janeiro/24 (7,93E+07) e recuperação em abril/24 (1,67E+08). Possível explicação: Este padrão indica que os valores de N variam com as condições de carregamento e sazonalidade, mas o desempenho pode melhorar com a mudança das condições.

A análise dos valores de N_{AASTHO} obtidos ao longo dos meses revela um comportamento consistente entre os grupos avaliados, caracterizado por uma redução progressiva em função das condições

sazonais e das variações de carga. Esse padrão reforça a hipótese de que fatores como sazonalidade (alterações climáticas) e carregamentos diferenciados impactam de forma significativa o desempenho estrutural do pavimento. Observa-se que, em alguns cenários, como N_5.4_jan_24_ad e N_4.1_jan_24_ad, as quedas mais acentuadas sugerem uma maior sensibilidade desses casos às condições externas e às tensões extraídas do software AEMC.

De forma geral, o valor de referência de laboratório (BSM Aderido) apresenta-se inferior aos valores iniciais obtidos em campo (out/23), o que pode ser atribuído à ausência de fatores externos no ensaio laboratorial. As oscilações identificadas ao longo dos meses, com quedas mais críticas em janeiro e abril, refletem a influência combinada da sazonalidade e das cargas aplicadas sobre o pavimento. Assim, torna-se essencial uma investigação mais aprofundada sobre as tensões principais e a resposta das diferentes misturas a essas variações, com o objetivo de compreender de maneira detalhada os fatores que contribuem para as reduções observadas nos valores de N.

Figura 186: Variação de N para as variações de módulos



Avaliação da seção crítica AEMC BR 116/RS km 495

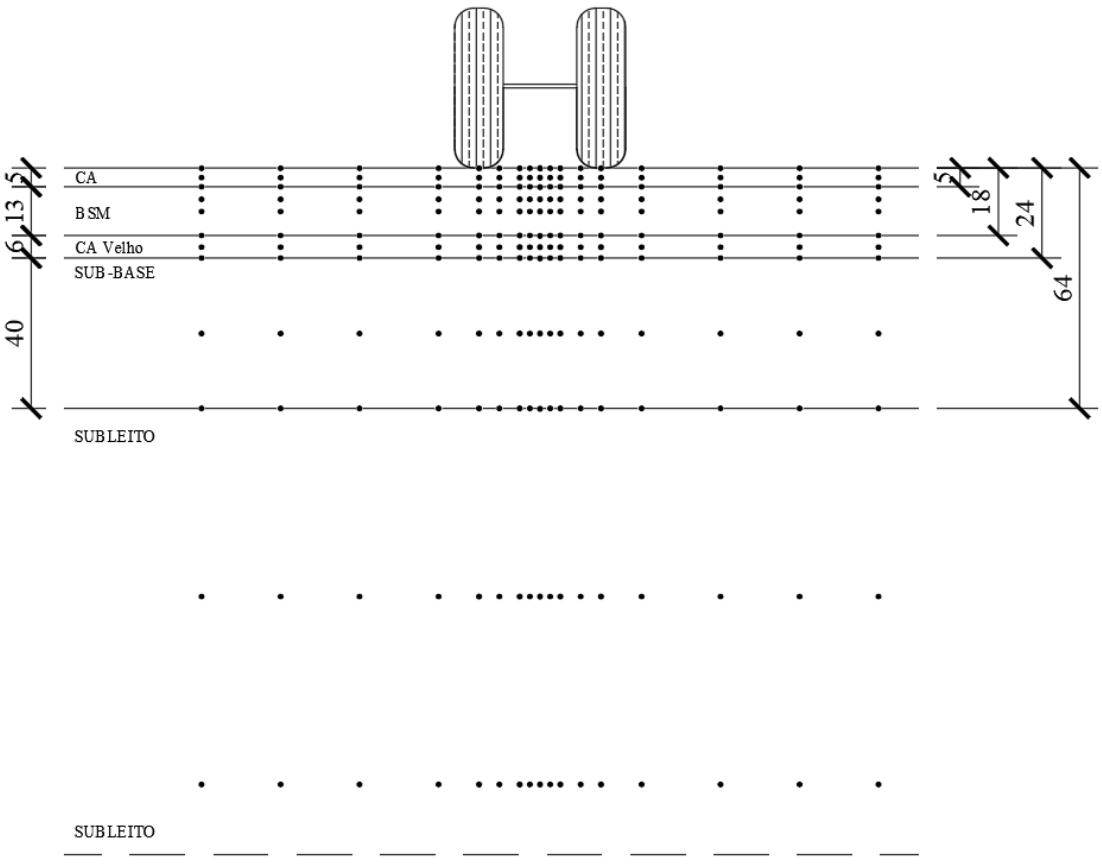
Para avaliar o comportamento das camadas a partir dos módulos retroanálisados e de laboratório, foi realizada a análise da seção crítica da BR-116/RS no km 495. O estudo consistiu em examinar o comportamento da seção frente à variação dos módulos, analisando as tensões principais nas camadas, os deslocamentos no eixo e as deformações específicas.

Para isso, utilizou-se uma malha de pontos definida com base na Tabela 44, que serviu como referência para compor o conjunto de pontos avaliados. A partir dessa malha, todos os pontos foram combinados entre si, formando uma matriz de interações. Nesse processo, os valores no eixo Y foram mantidos constantes (sempre iguais a zero), enquanto os eixos X e Z variaram. Com essa abordagem, foi possível avaliar as tensões principais, os deslocamentos e as deformações na seção crítica. Já a Figura 187, apresenta a malha de pontos na seção transversal.

Tabela 44: Pontos de análise

X (cm)	Y (cm)	Z (cm)
0	0	0,01
2,71	0	2,5
5,41	0	4,99
10,81	0	5,01
16,2	0	8,25
26,99	0	11,5
48	0	17,99
69	0	18,01
90	0	21
		23,99
		24,01
		44
		63,99
		64,01
		114
		164

Figura 187: Pontos de avaliação na seção crítica



Inicialmente, foi realizada a avaliação das tensões principais atuantes na seção crítica. Os dados foram obtidos por meio do software AEMC, considerando as camadas aderidas entre si, o que permitiu simular adequadamente o comportamento estrutural da pavimentação.

A análise das tensões principais foi conduzida com foco em uma seção reduzida, selecionada estrategicamente para facilitar a identificação e a interpretação das tensões atuantes especificamente na camada de BSM. Esse enfoque permitiu uma melhor compreensão das condições de carregamento e dos efeitos gerados pelas interações entre as camadas, contribuindo para avaliar a integridade estrutural e o desempenho da camada de BSM sob diferentes condições de aplicação de carga.

A Figura 188 apresenta os valores das tensões principais considerando a simulação no AEMC com os módulos retroanálisados de 2,7t e 4,2t. A Figura 189 apresenta os valores das tensões principais

nas camadas para a seção crítica para os valores de modulo retroanálisados de 5,2t e 7,2t. A Figura 190, apresente os valores de tensão principal S1 para os valores de modulo de laboratório.

Consegue-se perceber a partir da avaliação das Figura 188, Figura 189 e Figura 190, que as tensões principais s1 concentram-se nas camadas superiores, correspondendo aos primeiros 15cm do pavimento, onde encontra-se a camada de revestimos 5cm e de BSM 15cm. A maior tensão principal S1 obtida nas avaliações correspondeu a simulação considerando os dados de laboratório. Percebe-se que na maioria das situações as tensões maiores concentram-se logo abaixo das rodas do veículo padrão utilizado na simulação, com tensões médias de 0,65Mpa. A partir dos 15cm de profundidade, as tensões S1 são inferiores a 0,2MPa na maioria das situações avaliadas.

Com relação a variação das tensões ao longo dos meses, observou-se que janeiro apresentou valores mais acentuados de tensões S1, possivelmente ocasionado pela variação de temperatura das camadas. Com relação a variação de cargas, não houve uma significativa variação de tensões.

Figura 188: Tensão Principal S1 considerando 2,7t e 4,2t para os módulos retroanálisados

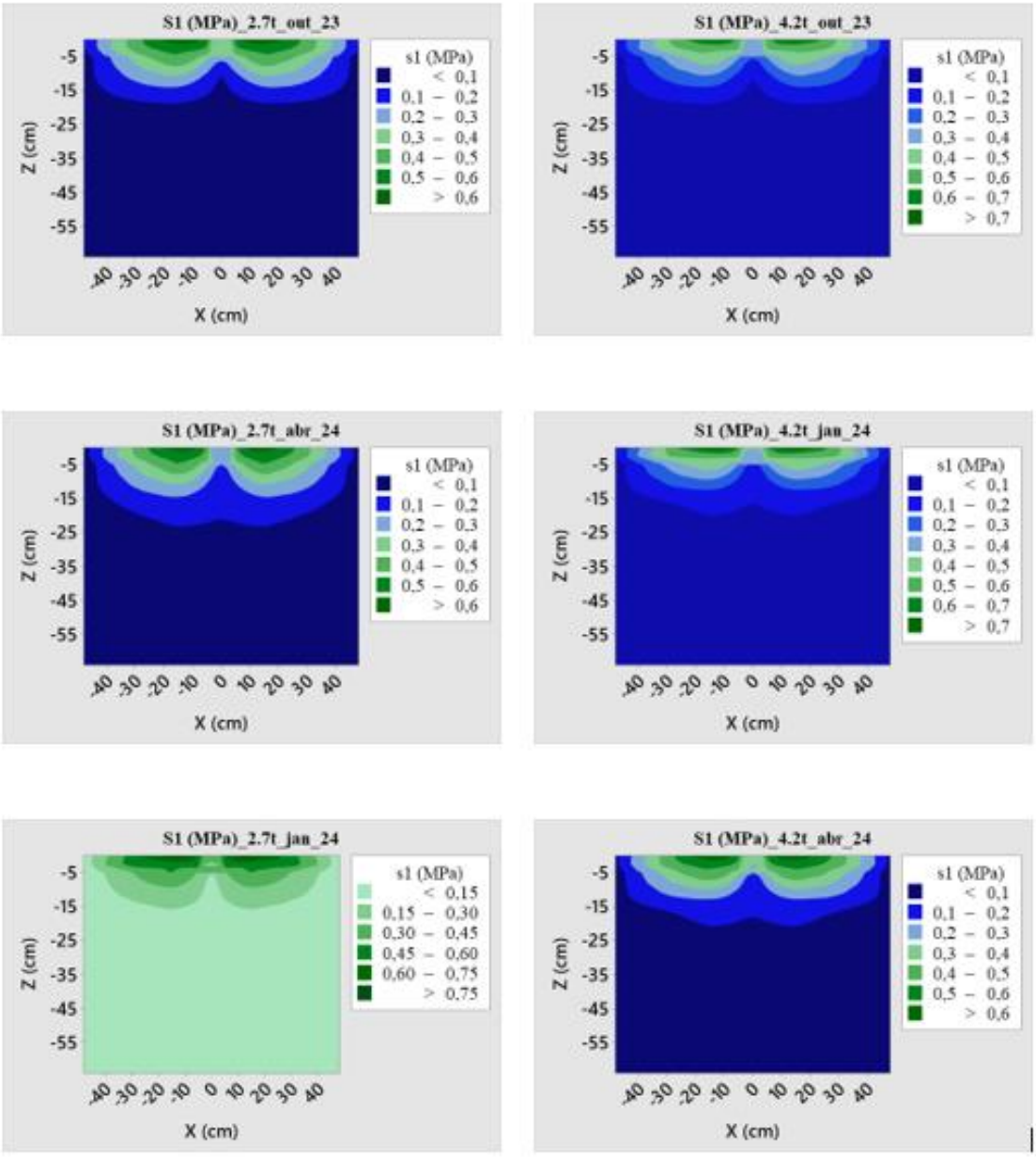


Figura 189: Tensão principal S1 considerando 5,2 e 7,2t para os módulos retroanálisados

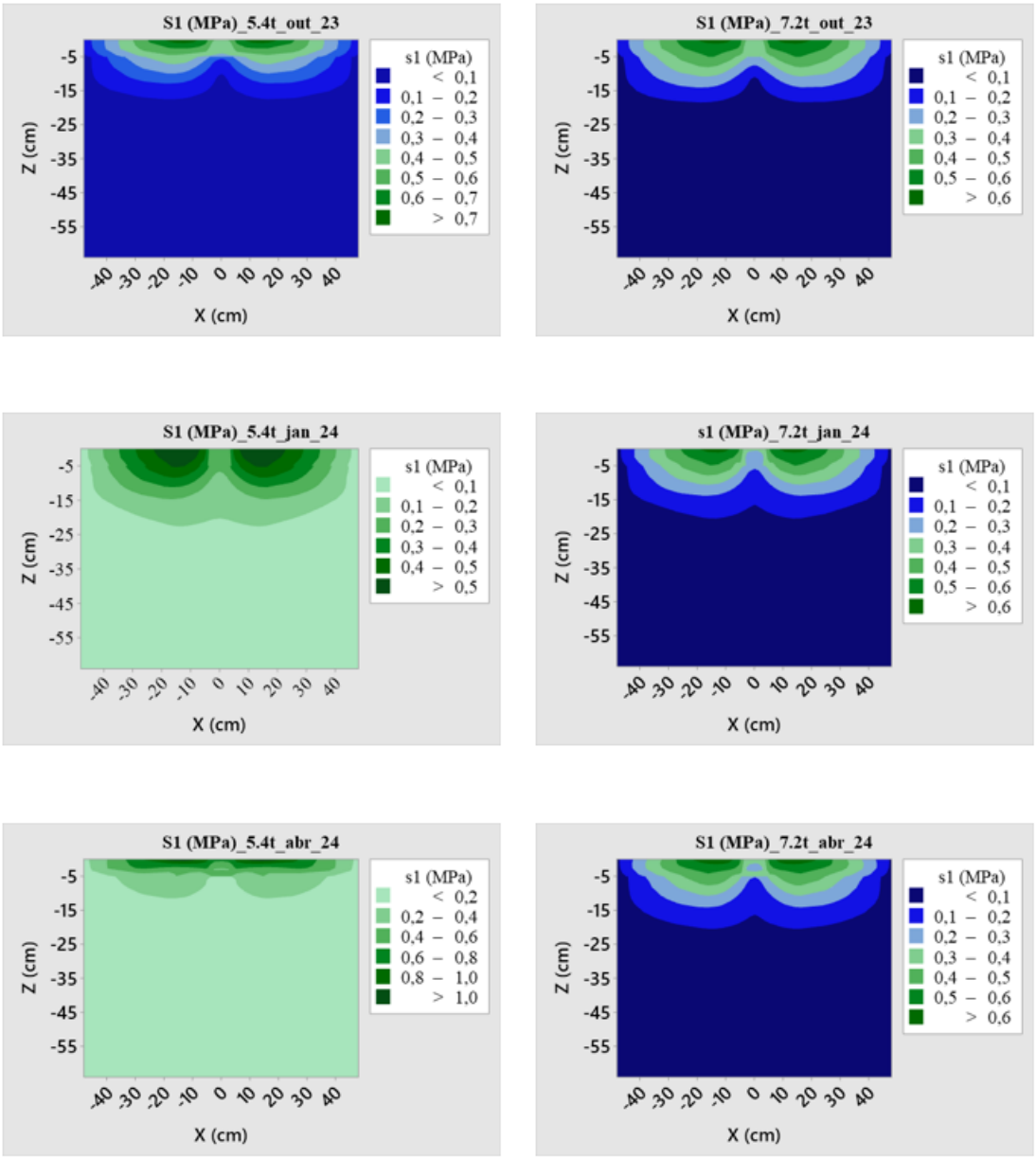
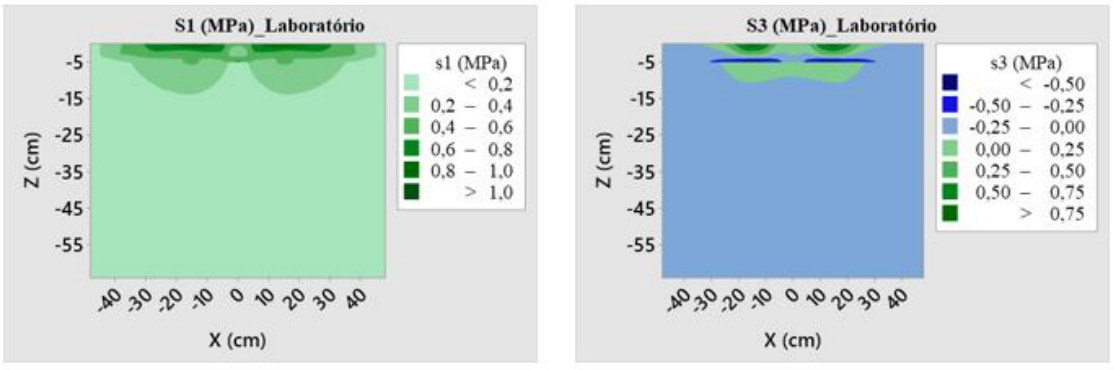


Figura 190: Simulação das tensões principais S1 e S3 com módulos de laboratório



Com relação a tensão principal S3, os resultados das simulações Figura 190, Figura 191 e Figura 192 são apresentados para à seção crítica do km 495 da BR116/RS. Observa-se que assim como as tensões principais S1, a concentração de tensões ocorre nos primeiro 15cm do pavimento avaliado, havendo concentração de tensões na camada de rolamento. Observa-se que valores correspondentes ao verde claro são valores muito pequenos de tensão ou até mesmo negativos, onde os mesmos concentram-se na parte inferior da BSM. A camada de BSM apresenta valores muito pequenos de tensão confinante S3. Contudo, ao avaliar a seção com dados de laboratório, a fibra inferior do revestimento apresenta tensões S3 negativas na cada dos 0,5Mpa, e tensões entre -0,25MPa e 0 MPa.

Figura 191: Tensão principal S3 considerando 2,7t e 4,0t para os módulos retroanálisados

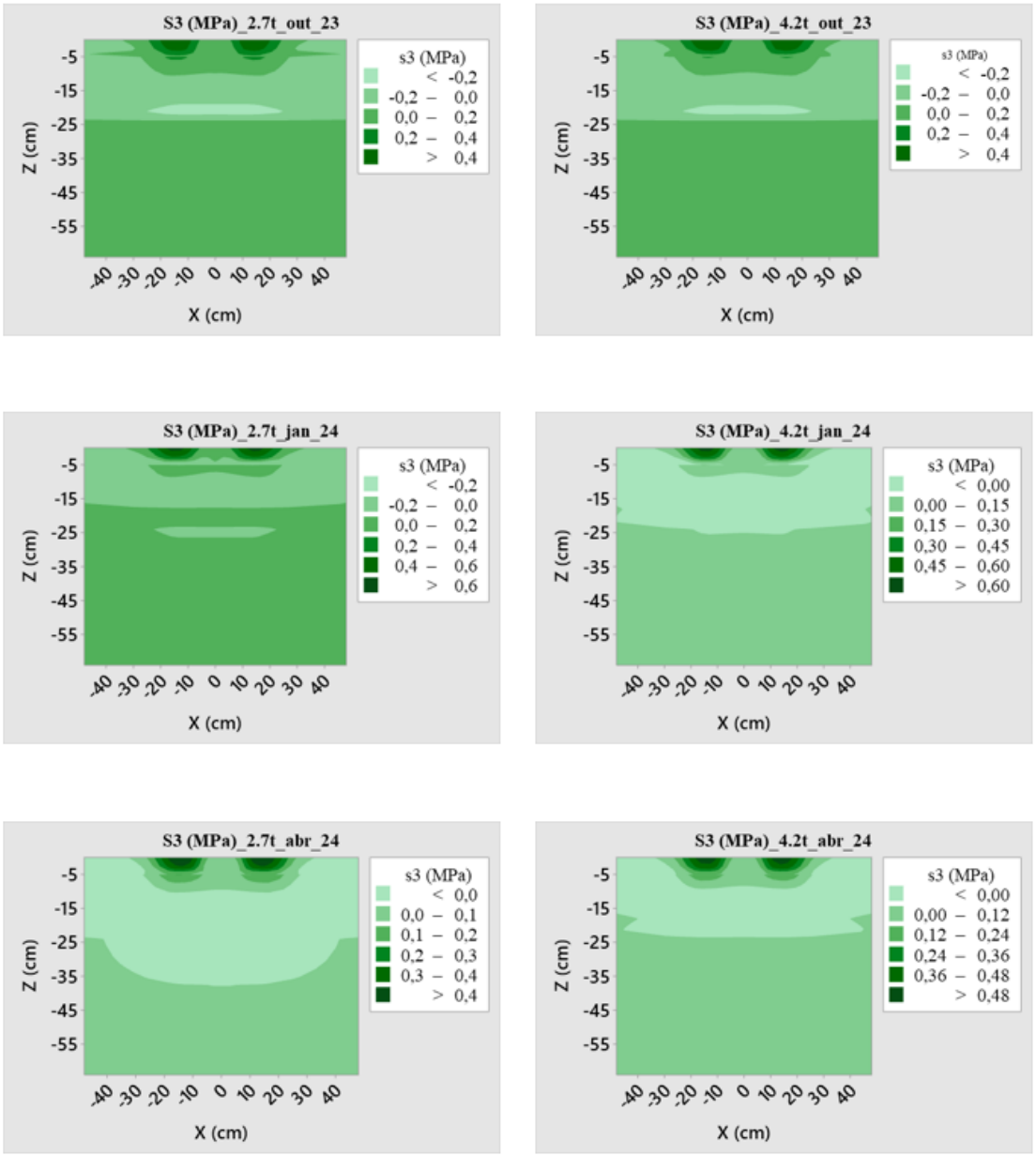
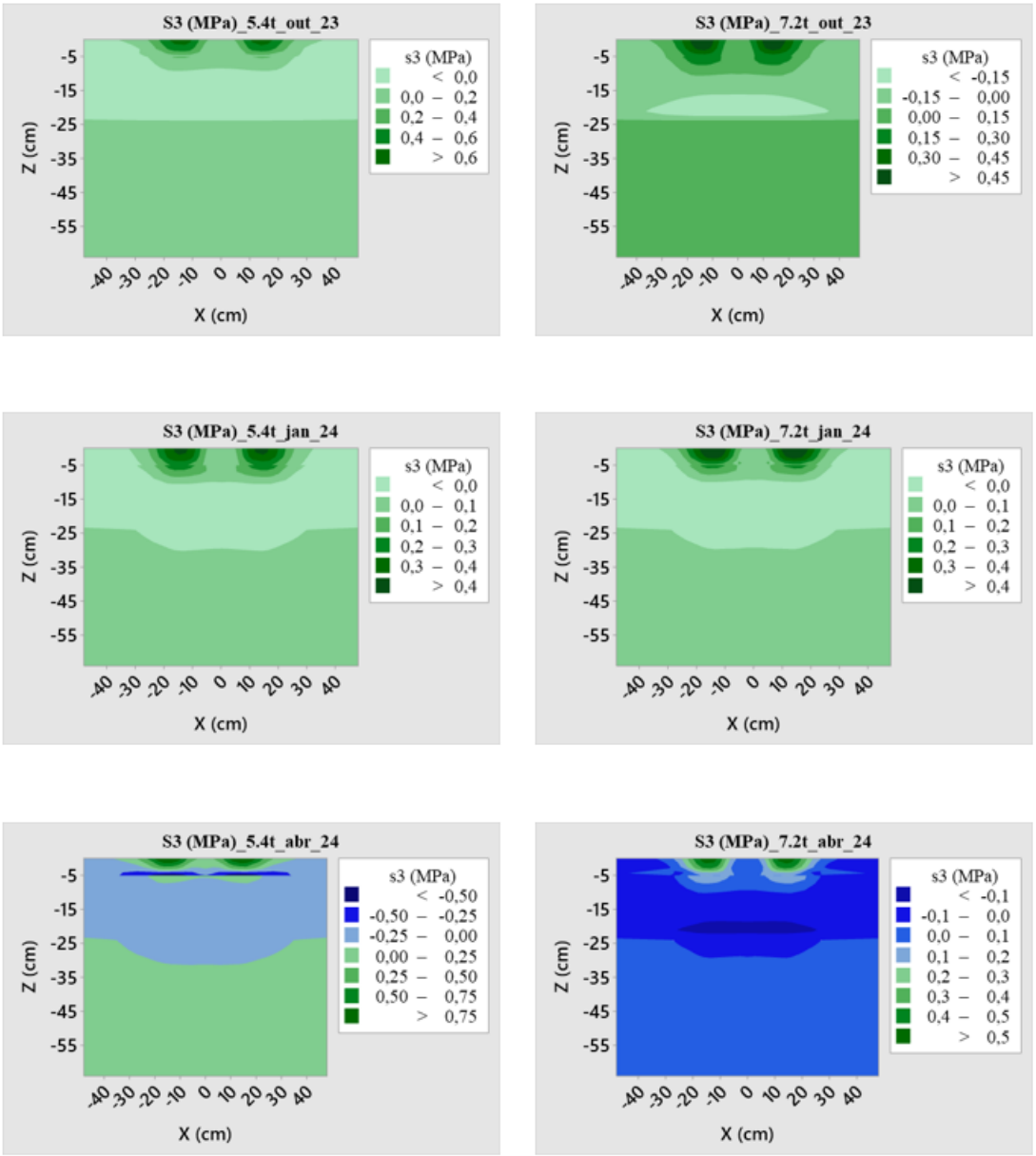


Figura 192: Tensão principal S3 considerando 5,2 e 7,2t para os módulos retroanálisados



A Figura 193 apresenta os deslocamentos Uz para a seção crítica considerando as diferentes condições avaliadas. Observa-se que para os maiores carregamentos, maiores deslocamentos são observados, assim como para períodos mais quentes, como janeiros e abril, mostrando a influência da temperatura e do carregamento na estrutura avaliada.

Figura 193: Deslocamentos Uz para a seção crítica para módulos retroanálisados para cargas de 2,7t e 4,2t

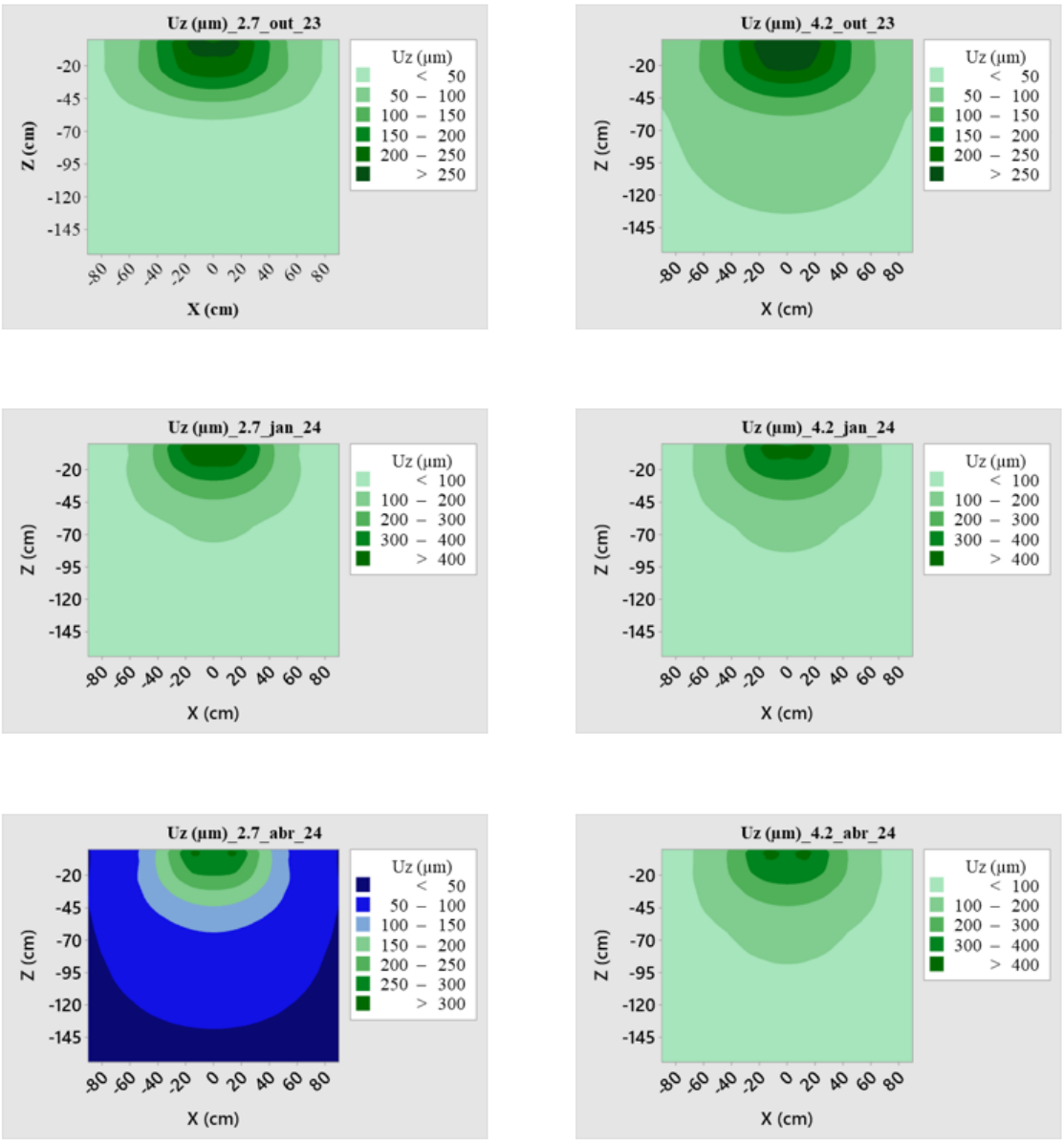


Figura 194: Deslocamentos Uz para a seção crítica e módulos retroanálisados para cargas 5,4 e 7,2t

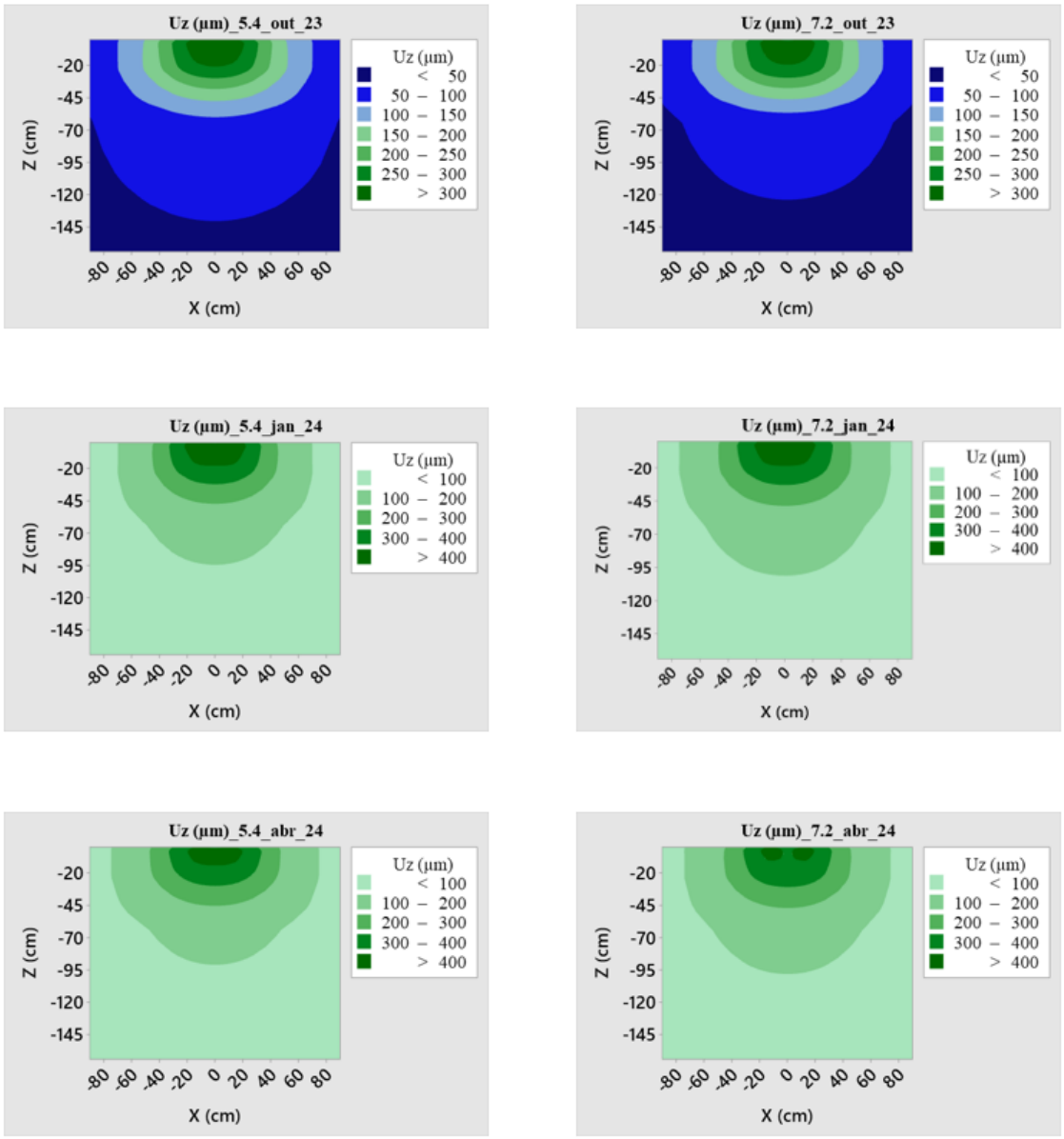
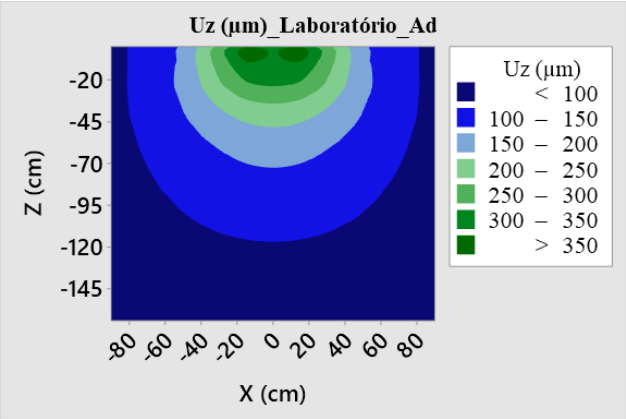


Figura 195: Deslocamentos UZ para a seção crítica considerando módulos de laboratório



5.5.1.2 Avaliação da variação sazonal a partir dos dados deflectométricas trimestrais

A análise dos dados dos quatro trechos avaliados – km 417 (crescente e decrescente), km 506, km 495 e km 174 – permite observar a influência significativa da sazonalidade nos valores dos módulos retroanálisados. A variação ao longo do ano, especialmente nos meses de janeiro, sugere que fatores climáticos, como a temperatura e as condições de umidade, desempenham um papel crucial no comportamento estrutural dos pavimentos.

Nos trechos km 417 e km 506, os módulos retroanálisados das camadas superiores, como o novo concreto asfáltico e a base estabilizada (BSM), apresentaram redução expressiva nos meses de janeiro em comparação com outros períodos do ano. Este comportamento pode ser atribuído ao aumento das temperaturas superficiais do pavimento, que tendem a reduzir a rigidez dos materiais asfálticos. No trecho do km 506, por exemplo, a camada de BSM registrou uma redução de módulos de 1.926 MPa em outubro de 2023 para 1.072 MPa em janeiro de 2024. De forma semelhante, no km 417, tanto na direção crescente quanto na decrescente, observou-se um comportamento semelhante, com quedas significativas nos módulos retroanálisados no mesmo período.

O trecho experimental do km 495, construído em janeiro de 2023, também evidenciou uma redução considerável nos módulos retroanalisados em janeiro de 2024, principalmente na camada de BSM,

que passou de 1.235 MPa em outubro de 2023 para 709 MPa em janeiro de 2024. Esse trecho apresentou peculiaridades devido à sua construção recente e à intervenção realizada em fevereiro de 2024, mas o padrão de queda sazonal foi semelhante ao dos outros trechos.

No caso do km 174, a influência da sazonalidade foi menos pronunciada, especialmente na camada de base estabilizada, que manteve valores elevados e consistentes ao longo do ano, inclusive em janeiro. Essa diferença pode ser atribuída à estrutura do pavimento e ao desempenho superior dos materiais utilizados nesse trecho específico, que foi construído em 2011 e apresenta maior maturidade estrutural.

A análise geral dos quatro trechos destaca que as camadas superiores, especialmente as de revestimento, são mais sensíveis às variações sazonais, enquanto as camadas inferiores, como a base de solo e a Subleito, apresentaram menor influência climática, mantendo valores relativamente constantes ao longo do ano. Essa diferença reflete a maior exposição das camadas superiores às condições ambientais.

Portanto, a sazonalidade, especialmente nos meses de altas temperaturas, mostrou-se um fator determinante para a variação dos módulos retroanalisados nos trechos avaliados. Esse comportamento reforça a importância de considerar fatores climáticos na concepção e manutenção de pavimentos, com estratégias específicas para mitigar os efeitos de variações sazonais, como a utilização de materiais mais resistentes às temperaturas elevadas e a adoção de intervenções preventivas em períodos críticos do ano.

A análise sazonal dos módulos de resiliência retroanalisados nos diferentes trechos avaliados (km 417, km 506 e km 495 da BR-116/RS, e km 174 da BR-392/RS), considerando as múltiplas cargas aplicadas, evidencia a interação entre a variação sazonal e o comportamento não linear dos materiais estabilizados. Essa abordagem permite identificar padrões relevantes que refletem tanto as características mecânicas dos materiais quanto os efeitos das condições ambientais ao longo do tempo.

No km 417 da BR-116/RS, a retroanálise mostrou que a influência da sazonalidade é acompanhada por uma variação nos módulos em função das cargas aplicadas. Cargas maiores resultaram consistentemente em módulos mais elevados, comportamento observado em todos os meses avaliados. Contudo, os menores valores de módulo foram registrados em janeiro de 2024,

evidenciando que a saturação e o aumento da umidade durante o período chuvoso impactaram negativamente a rigidez do material, mesmo sob cargas maiores.

O km 506 da BR-116/RS, que utiliza uma base estabilizada com RAP, apresentou módulos mais altos e consistentes ao longo do período avaliado, reforçando a maior rigidez desse material em comparação aos outros trechos. A análise com múltiplas cargas indicou que o comportamento não linear do material se mantém mesmo sob variações sazonais, com módulos mais elevados observados para cargas maiores. Em janeiro de 2024, uma leve redução nos módulos sugere que a sazonalidade afeta o material, mas em menor intensidade devido à maior estabilidade estrutural proporcionada pelo RAP.

No km 495 da BR-116/RS, os módulos foram consistentemente mais baixos, com os menores valores observados em abril de 2024. As múltiplas cargas demonstraram que o material é sensível ao aumento de carga, apresentando módulos maiores para cargas elevadas. Entretanto, a sazonalidade, especialmente em períodos de maior saturação, reduziu significativamente a rigidez, indicando que materiais mais recentes e em fase de consolidação estrutural são mais vulneráveis às condições climáticas adversas.

No km 174 da BR-392/RS, os módulos retroanálisados apresentaram grande variação em função das múltiplas cargas e sazonalidade. O comportamento não linear do material foi evidente, com módulos mais altos para cargas maiores. Contudo, o impacto da sazonalidade foi mais pronunciado, com reduções significativas nos períodos de maior umidade, especialmente em janeiro de 2024. Essa interação reflete a maior sensibilidade de bases estabilizadas mais antigas às variações climáticas, particularmente sob condições de saturação.

De forma geral, a análise dos dados retroanálisados confirma que a influência sazonal afeta todos os trechos avaliados, sendo amplificada pela interação com as múltiplas cargas aplicadas. A não linearidade do material estabilizado é consistente em todos os casos, com módulos mais elevados para cargas maiores, mas a magnitude desse comportamento é modulada pelas condições sazonais, que impactam a rigidez estrutural do material, especialmente em períodos de maior saturação e temperaturas elevadas.

Avaliação variação da Sazonalidade BR 116/RS km 495

Os módulos de resiliência retroanalisados, avaliados na Figura 175, Figura 176 e Figura 177 demonstram um comportamento sazonal consistente ao longo do trecho. Em outubro de 2023 (primavera), os valores são, em geral, mais elevados em comparação a janeiro de 2024 (verão) e abril de 2024 (outono). Os menores valores são observados em abril, sugerindo que as condições climáticas características do outono, como maior umidade acumulada, impactam negativamente a rigidez do pavimento. O comportamento não linear do material é evidente em todos os períodos, com módulos mais altos para cargas maiores, mas a magnitude desse comportamento varia sazonalmente.

As figuras também evidenciam o impacto significativo da sazonalidade sobre os módulos de resiliência ao longo do trecho avaliado, após a exclusão de valores considerados outliers. Essa exclusão permitiu uma análise mais uniforme e consistente dos dados, destacando padrões sazonais relevantes para cada período do ano.

No mês de outubro de 2023, representado pela Figura 175, observa-se os maiores valores médios de módulo de resiliência ao longo de todo o trecho, especialmente nas regiões intermediárias e finais (495+420m a 495+560m). Os módulos atingem valores superiores a 1000 MPa para cargas maiores (71,2 kN), refletindo a influência favorável das condições climáticas de primavera, que apresentam menor saturação e temperaturas mais amenas. Este comportamento é consistente com a maior rigidez estrutural observada nas camadas superiores do pavimento nesse período.

Em janeiro de 2024, conforme representado pela Figura 176, verifica-se uma redução significativa nos módulos de resiliência em relação a outubro de 2023. Esse comportamento é particularmente evidente nas regiões iniciais e intermediárias do trecho (495+340m a 495+500m), onde os módulos para cargas maiores variam entre 700 e 1000 MPa, enquanto para cargas menores (26,7 kN e 40 kN) os valores permanecem abaixo de 600 MPa. A sazonalidade, associada às altas temperaturas típicas do verão, influencia negativamente a rigidez do pavimento, especialmente nas camadas superiores, devido à maior sensibilidade dos materiais asfálticos ao calor.

Por fim, em abril de 2024, representado pela Figura 177, os menores valores de módulo de resiliência são observados ao longo de todo o trecho, refletindo o impacto das condições de maior saturação e umidade características do outono. As regiões iniciais (495+340m a 495+400m) apresentam os menores valores médios de módulo, abaixo de 700 MPa para todas as cargas

avaliadas, enquanto as regiões intermediárias e finais (495+420m a 495+560m) demonstram uma leve recuperação dos valores para cargas maiores, atingindo valores próximos de 1000 MPa. Ainda assim, os módulos médios permanecem significativamente inferiores aos registrados nos meses de outubro e janeiro.

De forma geral, a comparação entre os três períodos analisados reforça que a sazonalidade exerce influência direta sobre o comportamento estrutural do pavimento. Os maiores valores de rigidez são observados no mês de outubro, seguido por uma redução moderada em janeiro e uma queda acentuada em abril. A região final do trecho (495+520m a 495+560m) demonstrou maior estabilidade ao longo dos períodos, apresentando os menores impactos das variações climáticas, enquanto a região inicial (495+340m a 495+400m) foi a mais sensível às condições sazonais.

Avaliação variação da Sazonalidade BR 392/RS km 174

A análise dos dados do módulo de resiliência (MR) para o trecho correspondente ao km 174 da BR 392/RS foi realizada com base nos gráficos referentes aos meses de junho de 2023, Figura 167, outubro de 2023 Figura 168, janeiro de 2024 Figura 169 e abril de 2024 Figura 170. Esses gráficos apresentam os valores do módulo de resiliência em diferentes condições de carga: 26,7 kN, 40 kN, 53,4 kN e 71,2 kN.

No mês de junho de 2023, observou-se na Figura 167 que os valores de MR apresentaram distribuição heterogênea ao longo das estacas. As cargas de 71,2 kN e 40 kN mostraram-se mais consistentes, com picos mais pronunciados em algumas estacas, como em 174+520 m e 174+700 m. Entretanto, também foram identificados valores baixos em trechos específicos, indicando possível variação significativa nas condições do subleito.

Em outubro de 2023, houve uma redução geral nos valores de MR em relação ao mês de junho. As cargas de 26,7 kN e 40 kN apresentaram comportamento mais uniforme ao longo das estacas, enquanto as cargas de 53,4 kN e 71,2 kN evidenciaram uma maior amplitude de variação, com picos ainda mais concentrados em estacas como 174+540 m e 174+880 m.

Em janeiro de 2024, os valores de MR mostraram uma tendência de recuperação em relação a outubro de 2023. Houve aumento nos picos máximos de MR, especialmente para as cargas de 53,4 kN e 71,2 kN, destacando estacas como 174+760 m e 174+920 m. A distribuição, contudo,

permaneceu irregular, indicando que o comportamento do subleito ainda era influenciado por condições específicas de cada trecho.

Em abril de 2024, os valores de MR alcançaram os maiores picos observados entre os quatro períodos analisados, especialmente sob cargas de 40 kN e 71,2 kN. As estacas 174+720 m e 174+940 m apresentaram valores expressivamente elevados, superando 5000 MPa. No entanto, as cargas de 26,7 kN e 53,4 kN mostraram maior regularidade.

A sazonalidade mostrou uma influência significativa nos valores do módulo de resiliência (MR) do subleito no trecho avaliado da BR 392/RS. Os períodos analisados revelaram que as condições climáticas e ambientais características de cada estação impactaram diretamente o comportamento mecânico do material estabilizado.

Os meses de junho de 2023 e abril de 2024 apresentaram os melhores resultados em termos de valores de MR, o que pode ser associado a condições de umidade mais favoráveis e temperaturas que promovem maior rigidez do subleito. Em contrapartida, outubro de 2023 e janeiro de 2024 demonstraram maior variabilidade nos valores de MR, sugerindo que o aumento da umidade no subleito (provavelmente devido às chuvas ou maior saturação) pode ter reduzido a resistência mecânica do material. Portanto, a sazonalidade desempenha um papel crucial na performance do subleito, influenciando tanto a regularidade quanto a magnitude dos valores de MR

Avaliação variação da Sazonalidade BR 116/RS km 506

A análise dos dados do módulo de resiliência (MR) para o trecho correspondente ao km 506 da BR 116/RS foi realizada com base nos gráficos referentes aos meses de junho de 2023 (Figura 171), outubro de 2023 (Figura 172), janeiro de 2024 (Figura 173) e abril de 2024 (Figura 174).

A influência da sazonalidade é evidente na variação dos módulos de resiliência retroanalisados para a base estabilizada ao longo dos diferentes períodos analisados. As condições climáticas sazonais, como variações de temperatura e umidade, afetam diretamente o comportamento mecânico do subleito, influenciando a capacidade de suporte e a rigidez do material.

Nos meses mais úmidos (como junho de 2023), observou-se maior variabilidade e redução nos valores de MR em alguns trechos, sugerindo que o excesso de umidade pode comprometer a rigidez da base estabilizada. Em meses mais secos (como janeiro e abril de 2024), os valores de MR foram

geralmente mais elevados, indicando melhor desempenho do subleito sob condições de menor saturação.

A sazonalidade tem uma influência significativa no comportamento da base estabilizado, com variações de MR associadas às mudanças climáticas ao longo do ano. Além disso, a interação entre as condições sazonais e as cargas aplicadas é evidente, destacando a importância de considerar ambos os fatores no planejamento e manutenção da rodovia.

Avaliação variação da Sazonalidade BR 116/RS km 416

A análise foi conduzida com base nos gráficos correspondentes aos meses de junho de 2023, outubro de 2023, janeiro de 2024 e abril de 2024, respectivamente Figura 163, Figura 164, Figura 165, Figura 166 . Os valores do módulo de resiliência (MR) foram avaliados para as cargas de 26,7 kN, 40 kN, 53,4 kN e 71,2 kN ao longo das estacas no trecho decrescente do km 417.

A sazonalidade influencia significativamente os valores de MR. Observou-se que os meses de outubro de 2023 e abril de 2024 apresentaram os maiores valores de MR, sugerindo melhores condições estruturais durante períodos de menor índice de umidade no subleito. Em contrapartida, janeiro de 2024 e junho de 2023 apresentaram maiores variações nos valores de MR, possivelmente devido à maior influência da umidade e às condições climáticas adversas. As cargas mais elevadas (53,4 kN e 71,2 kN) tendem a evidenciar as maiores variações nos valores de MR, destacando picos significativos em estacas específicas. As cargas menores (26,7 kN e 40 kN) apresentaram distribuição mais uniforme, mas também foram sensíveis à sazonalidade, especialmente em períodos de alta umidade.

A análise foi conduzida com base nos gráficos correspondentes aos meses de junho de 2023, outubro de 2023, janeiro de 2024 e abril de 2024, respectivamente Figura 167, Figura 168, Figura 169, Figura 170. Os valores do módulo de resiliência (MR) foram avaliados para as cargas de 26,7 kN, 40 kN, 53,4 kN e 71,2 kN ao longo das estacas no trecho crescente do km 417. A sazonalidade teve impacto direto nos valores de MR, com os meses de outubro de 2023 e abril de 2024 apresentando os maiores valores médios. Nos meses de janeiro de 2024 e junho de 2023, os valores foram mais baixos, possivelmente devido a condições climáticas menos favoráveis, como maior

umidade. As cargas mais altas (53,4 kN e 71,2 kN) evidenciaram os maiores picos de MR, especialmente em estacas como 417+600 m e 417+580 m. As cargas menores (26,7 kN e 40 kN) apresentaram maior regularidade, mas ainda assim foram afetadas pela sazonalidade.

Quando realizada a correlação dos trechos, em ambos os trechos, os meses de outubro de 2023 e abril de 2024 apresentaram os maiores valores de módulo de resiliência (MR), sugerindo que períodos de menor umidade proporcionam melhores condições estruturais. Nos meses de janeiro de 2024 e junho de 2023, os valores de MR foram mais baixos e apresentaram maior variação, possivelmente devido ao aumento da umidade e à influência das condições climáticas.

5.5.1.3 Curvas de acompanhamento de previsão de desempenho dos materiais em estudo com modelos de previsão de desempenho compatíveis.

A avaliação dos modelos de desempenho foi iniciada a partir da obtenção das curvas de modulo dinâmico apresentadas no relatório parcial 2 e dados de Fadiga na tração direta (FTD) e SSR (Stress Sweep Rutting).

O modelo S-VECD (Simplified Viscoelastic Continuum Damage) é uma abordagem matemática amplamente utilizada para prever o comportamento de fadiga e danos em misturas asfálticas submetidas a condições de carregamento cíclico. Ele integra conceitos de viscoelasticidade e mecânica de dano contínuo, proporcionando uma análise detalhada da deterioração progressiva dos materiais asfálticos ao longo do tempo.

A base do modelo está na caracterização da viscoelasticidade, que descreve o comportamento dependente do tempo e da temperatura do asfalto. Para isso, o modelo utiliza o princípio da superposição tempo-temperatura, permitindo representar a resposta do material em diferentes condições ambientais e de carregamento. Além disso, o modelo incorpora a mecânica de dano contínuo para representar a evolução de microtrincas e falhas no material, monitorando a degradação progressiva da rigidez da mistura asfáltica por meio de variáveis internas que avaliam o estado do dano.

Um elemento central do S-VECD é a curva característica de dano, que relaciona o dano acumulado à pseudodeformação, uma medida dependente do tempo e do estado do material. Essa curva é única para cada mistura asfáltica, sendo independente de fatores como amplitude de carga ou histórico de carregamento. Adicionalmente, o modelo define um critério de falha, que determina o ponto em que o material atinge seu limite de dano, permitindo prever o número de ciclos de carga até a falha estrutural em diferentes condições de tensão ou deformação.

O S-VECD é amplamente aplicado na previsão de vida útil de pavimentos, sendo uma ferramenta essencial no projeto e na análise de misturas asfálticas, além de contribuir para o desenvolvimento de especificações baseadas no desempenho. Sua abordagem simplificada e eficiente permite que seja utilizado em uma ampla gama de condições de tráfego e clima, auxiliando na otimização do desempenho e da durabilidade dos pavimentos.

Ensaio triaxial de varredura de tensão (SSR)

O ensaio SSR será executado conforme norma ainda provisória AASHTO TP 134/2018. As amostras foram produzidas com 100 mm de diâmetro por 150 mm de altura, no CGS até atingir a densidade máxima teórica do ensaio de Proctor de 2069g/cm³. Conforme norma, para cada temperatura, o ensaio deve ser realizado em duplicata caso a diferença de deformação no final do ensaio não seja superior a 25%.

As temperaturas de ensaio foram fixadas em 17ºC para a temperatura baixa e 47ºC para a temperatura alta, mesmas temperaturas definidas por Bastos (2016) e Choi (2013). Os ensaios foram realizados utilizando a MTS 810 presente no Laboratório de pavimentação da UFRGS e câmara triaxial e sistema pneumático. Os dados foram analisados em planilha Excel e o Shift Model será determinado a partir da planilha FlexMAT Rutting v2.1.1 desenvolvida pela NC State University e disponível no site do FHWA (FHWA, 2022).

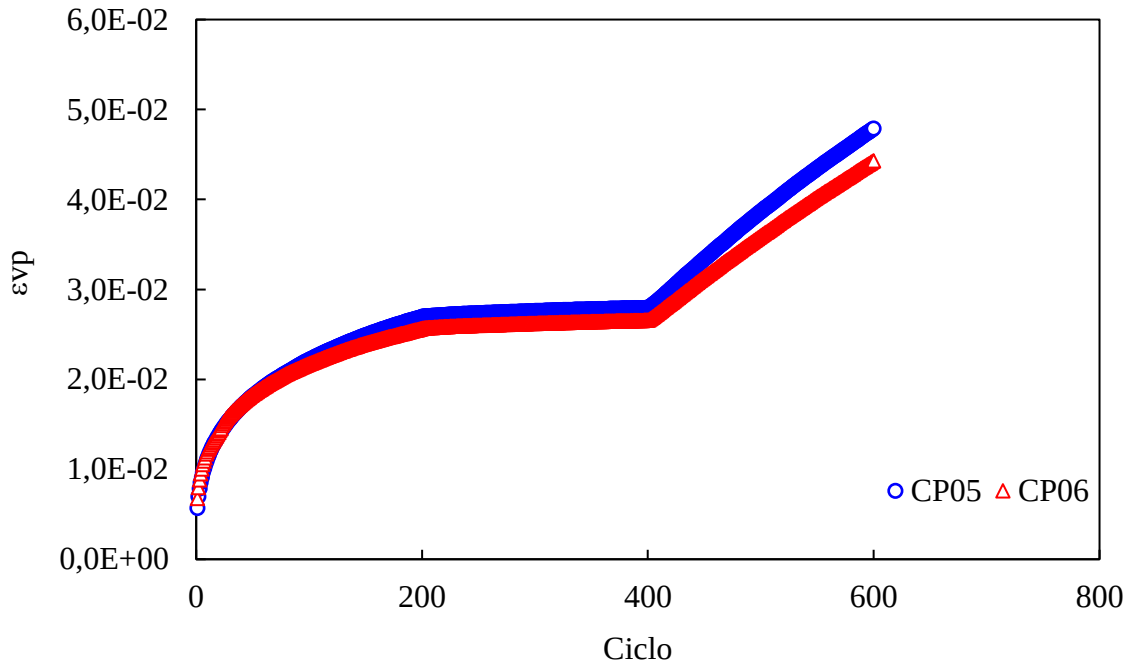
A execução do ensaio de SSR ocorreu com 4 corpos de prova, sendo dois na temperatura baixa 20°C e dois na temperatura alta 54°C. A **Tabela 45** apresenta os dados dos Corpos de prova utilizados para a realização do ensaio de SSR.

Tabela 45: Características amostras SSR

Características amostras			
Amostra	Altura (cm)	Diâmetro (cm)	Temperatura de ensaio (°C)
CP09	14,97	10,00	20
CP10	15,18	10,00	20
CP05	14,98	10,00	54
CP06	15,00	10,00	54

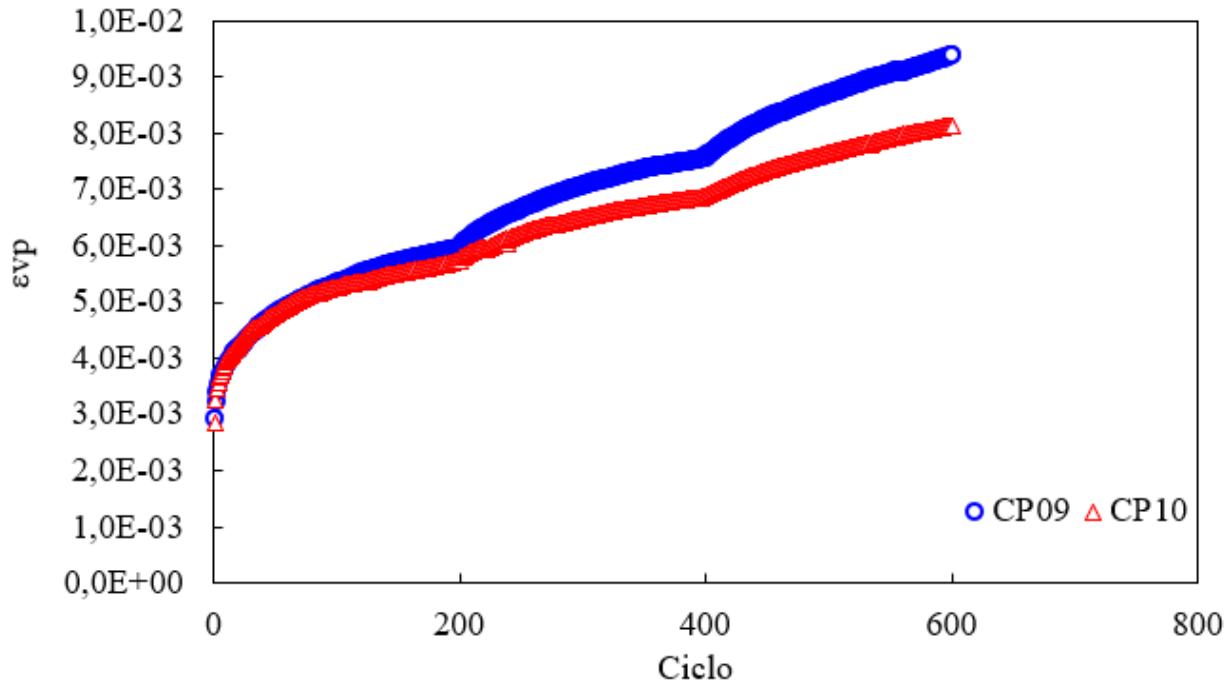
A **Figura 196** apresenta os resultados de SSR para temperatura Alta apresenta valores significativamente maiores de deformação permanente (εvp) ao longo dos ciclos de carregamento, com um crescimento mais pronunciado após o ciclo 400. Os corpos de prova (CP05 e CP06) exibem comportamentos similares, embora o CP05 apresente deformações ligeiramente superiores ao CP06 nos ciclos finais. A alta temperatura reduz a rigidez do material, tornando-o mais suscetível ao rutting (deformação plástica acumulada), especialmente sob cargas repetitivas.

Figura 196: Resultado SSR Temperatura Alta



A o gráfico em baixa temperatura evidencia deformações permanentes significativamente menores ao longo dos ciclos de carregamento. Os corpos de prova (CP09 e CP10) mantêm um comportamento mais estável, com curvas menos inclinadas e menor acumulação de deformações, mesmo após o ciclo 400. O CP09 apresenta deformações um pouco mais altas que o CP10 nos ciclos finais, mas ambas permanecem dentro de um intervalo relativamente pequeno, sugerindo maior rigidez e resistência ao cisalhamento sob baixas temperaturas. A Figura 197 apresenta os resutaldos de SSR para tempertura baixa. Em comparação, o gráfico em baixa temperatura evidencia deformações permanentes significativamente menores ao longo dos ciclos de carregamento. Os corpos de prova (CP09 e CP10) mantêm um comportamento mais estável, com curvas menos inclinadas e menor acumulação de deformações, mesmo após o ciclo 400. O CP09 apresenta deformações um pouco mais altas que o CP10 nos ciclos finais, mas ambas permanecem dentro de um intervalo relativamente pequeno, sugerindo maior rigidez e resistência ao cisalhamento sob baixas temperaturas.

Figura 197: Resultado SSR Temperatura Baixa



Comparando a Figura 196 e Figura 197 , observa-se que a temperatura desempenha um papel crucial no comportamento das misturas. Em alta temperatura, o aumento da ductilidade do ligante resulta em maiores deformações permanentes e uma menor capacidade de resistência ao cisalhamento. Por outro lado, em baixa temperatura, o material se comporta de forma mais rígida, apresentando menor acúmulo de deformações ao longo dos ciclos. Essa diferença ressalta a importância de considerar as condições de temperatura na análise de desempenho das misturas asfálticas, especialmente em projetos que demandam resistência a deformações permanentes em diferentes condições climáticas.

Ensaio fadiga na tração direta (FTD)

O ensaio de tração direta (FTD) é um método utilizado para avaliar a resistência de misturas asfálticas sob esforços de tração, especialmente em condições de fadiga. Nele, uma amostra é submetida a esforços monotônicos ou cíclicos, permitindo analisar parâmetros como tensão máxima, deformação, número de ciclos até a falha e módulo de elasticidade dinâmico. Este ensaio é amplamente aplicado no estudo da durabilidade de pavimentos, sendo fundamental para prever o desempenho mecânico em condições reais de tráfego.

A curva C versus S representa a relação entre a deformação acumulada (C) e a tensão aplicada ou ciclos de carga (S). Essa curva é utilizada para descrever o comportamento progressivo de materiais asfálticos submetidos a cargas repetidas, evidenciando a evolução da deformação em função das solicitações aplicadas. É uma ferramenta importante para caracterizar a resistência à fadiga, auxiliando na compreensão do comportamento estrutural do pavimento ao longo de sua vida útil.

Realizou-se a avaliação do material BSM-EARP-nE para o ensaio de Fadiga a Tração direta, conforme procedimento do item 3.5.1.5. A O parâmetro α (alpha), obtido no ensaio de tração direta, é um coeficiente que descreve a taxa de acumulação de deformações em misturas asfálticas submetidas a carregamentos cíclicos. Ele representa a sensibilidade do material ao acúmulo de dano, sendo diretamente relacionado à resistência à fadiga. Valores menores de α indicam uma menor taxa de deformação acumulada, refletindo maior resistência e durabilidade da mistura. Esse parâmetro é amplamente utilizado na modelagem do desempenho de pavimentos, auxiliando na

previsão da vida útil e no desenvolvimento de materiais mais resistentes a esforços repetidos.Figura 198 apresenta a curva C versus S obtidas para o ensaio de FTD. Contudo, devido à natureza do material, os dados obtidos não condizem com o comportamento de uma mistura asfáltica. A

apresenta o resumo de dados obtido para o material. Observa-se que os dados obtidos não apresentam um comportamento condizente com um material asfáltico, ao qual apresenta um alpha de aproximadamente 4,0, a BSM estudada apresentou um alpha de 9,79, assim, não apresentando um bom comportamento. Logo, o material realmente não apresenta com comportamento a fatiga.

O parâmetro α (alpha), obtido no ensaio de tração direta, é um coeficiente que descreve a taxa de acumulação de deformações em misturas asfálticas submetidas a carregamentos cíclicos. Ele representa a sensibilidade do material ao acúmulo de dano, sendo diretamente relacionado à resistência à fadiga. Valores menores de α indicam uma menor taxa de deformação acumulada, refletindo maior resistência e durabilidade da mistura. Esse parâmetro é amplamente utilizado na modelagem do desempenho de pavimentos, auxiliando na previsão da vida útil e no desenvolvimento de materiais mais resistentes a esforços repetidos.

Figura 198: Curva C versus S - ensaio FTD

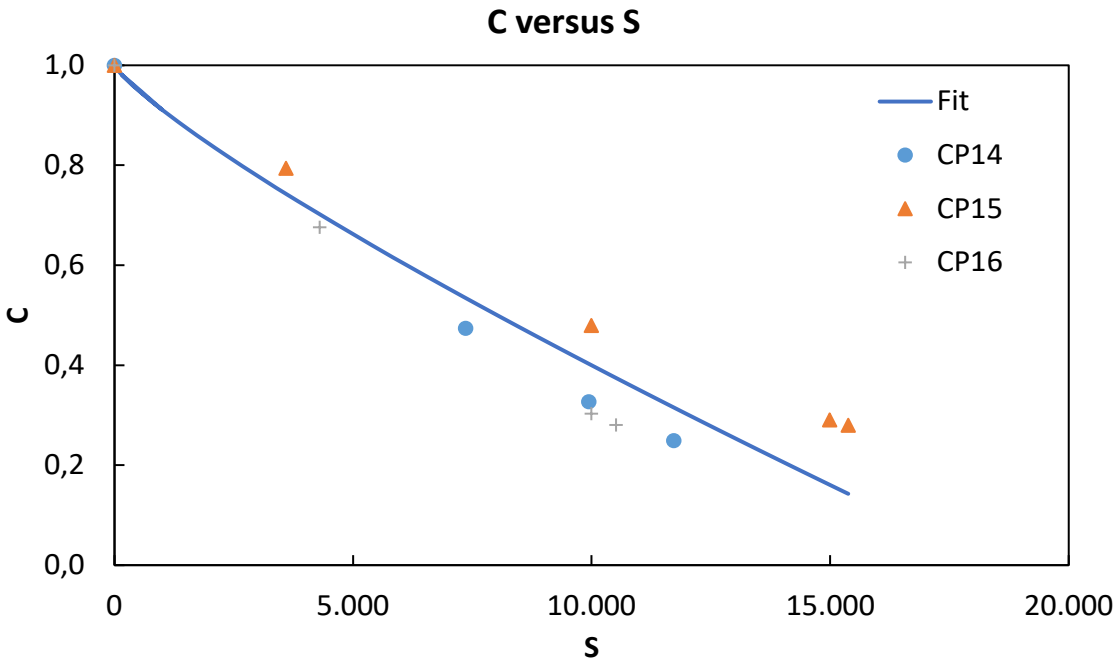


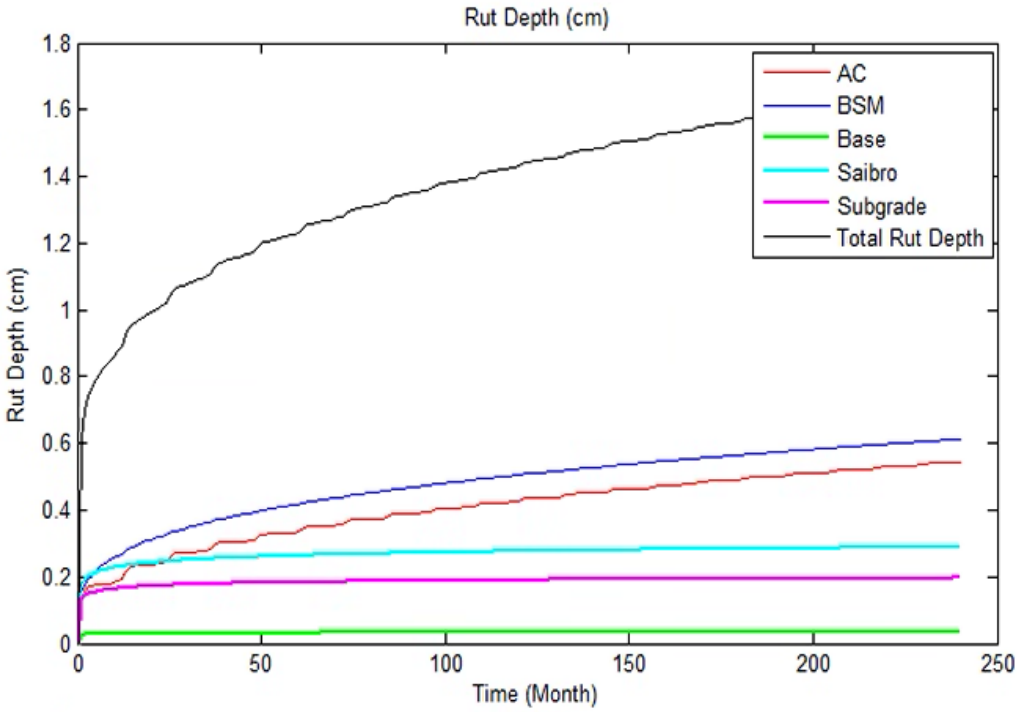
Tabela 46: Resumo S-VECD Fadiga BSM-EARP-nE

alpha	9,79
C vs. S	
C_{11}	2,92E-04
C_{12}	8,28E-01
DR Failure Criterion	
D^R	0,70
Damage Capacity	
S_{app}	0,47

Curvas de Previsão de desempenho

Com o auxílio do Software FlexPave, realizou-se a avaliação do material, considerando os dados de S-VECD obtidos para fadiga e deformação. Assim, a Figura 199, apresenta a curva de previsão de desempenho do material para deformação, considerando a estrutura utilizada no km 495 da BR 116/RS, trecho este construído com o material BSM-EARP-nE. A BSM apresenta um dano acumulado de 0,6 cm ao final de 20 anos.

Figura 199: Curva de desempenho Deformação permanente



Essa avaliação permite prever o comportamento da BSM a deformação permanente. Entretanto, deve-se considerar o material ganha resistência ao longo do tempo. Assim, deformações menores podem ser encontradas em campo. Ressalta-se também que esta previsão somente serve para mostrar o comportamento em laboratório do material. Caso seja necessário prever o desempenho em campo, um modelo de ajuste deve ser desenvolvido e calibrado, considerando as características do material.

5.5.2 Workshop de Divulgação

A divulgação dos trabalhos desenvolvidos no presente RDT foram realizadas em diversas etapas, levando informações e conhecimentos aprendidos ao longo do desenvolvimento do projeto para diferentes agentes da sociedade.

5.5.2.1 Divulgações 2023

Em 2023, realizou-se o 1º Workshop de Engenharia e Operação Viária de Pelotas, promovido pela ECOSUL, ao qual participou-se do evento divulgando as pesquisas e os conhecimentos adquiridos no desenvolvimento do RDT “ESTUDO DE COMPÓSITOS DE CIMENTO, EMULSÃO COM FRESADO ASFÁLTICO E AGREGADOS VIRGENS PARA BASES DE ELEVADO DESEMPENHO”. Este workshop foi realizado como parte integrante do projeto, e realizando a divulgação parcial dos dados obtidos até outubro de 2023. O Workshop realizado foi focado no público regional do Sul do País, convidados prefeituras, órgãos, empresas, acadêmicos, estudantes, trazendo uma ampla programação sobre estrutura e segurança viária, pavimentação e interação da Concessionária com a sociedade.

Este workshop representou a entrega parcial da etapa de elaboração do evento, conforme previsto no projeto, marcando o início da divulgação dos dados obtidos. Durante o encontro, identificou-se a possibilidade de realizar um novo workshop no segundo semestre de 2024. No entanto, essa iniciativa foi inviabilizada devido às dificuldades enfrentadas pelo estado do Rio Grande do Sul em 2024.

Ainda em 2023, o Coordenador do Projeto Prof. Lélio Brito participou da PAVING Expo em São Paulo, onde ministrou uma palestra intitulada Resultados de estudos de laboratório com amostras do processo FDR, disponibilizada no ANEXO XII.

A convite da ANTT em dezembro de 2023, participou-se do “XIII WORKSHOP RDT – RECURSOS PARA DESENVOLVIMENTO TECNOLÓGICO” realizado junto a sede da ANTT em Brasília - DF. Durante o evento, além da participação nas palestras, um estande foi montado para a divulgação do Estudo sobre Bases Estabilizadas com Emulsão. A presente participação foi retratada no relatório parcial dois, trazendo os ANEXO VI e ANEXO VII como materiais do evento.

5.5.2.2 Divulgações 2024

Com o desenvolver do projeto, realizaram-se novas divulgações do material obtido com o trabalho em 2024. Em julho de 2024 a pedido do Grupo ECORODOVIAS foi fornecida uma apresentação com os dados parciais para apresentação na “26º Encontro de Asfalto - 1ª edição” com organização

do IBP – Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás. A apresentação foi realizada pelo Eng. Dr. Douglas Mocelin e o Eng. Dr. Claudio Dias, Figura 200, ao qual acompanham diretamente o desenvolvimento da pesquisa. No ANEXO XIII está disponibilizado a apresentação realizada. As apresentações no Encontro do Asfalto atingem um público amplo, pois dele participam diversos entes da sociedade, como profissionais de engenharia, concessionarias, órgãos públicos e estudantes.

Figura 200: Apresentação 26° Encontro do Asfalto



Novamente em 2024 foi solicitado pela ANTT uma apresentação e participação do XIV WORKSHOP RDT - RECURSOS PARA DESENVOLVIMENTO TECNOLÓGICO ao qual ocorreu na cidade de Brasília-DF, em 21 de outubro de 2024, no Auditório da UNB. O ANEXO XIV disponibiliza a apresentação enviada a ANTT.

SIREMA

Entre os dias 26 a 29 de novembro de 2024, ocorreu na cidade de São Carlos-SP, o 3° Simpósio de Reciclagem de Misturas Asfálticas – SIREMA, junto a EESC-USP Campus São Carlos. O Prof. Lélio Brito como Diretor Técnico da Associação Brasileira de Pavimentação - ABPv, fez parte da

comissão de organização do 3º Simpósio de Reciclagem de Misturas Asfálticas na qual foram apresentados os trabalhos desenvolvidos no âmbito do RDT e outros projetos especificamente vinculado aos estudos de compósitos de cimento, emulsão com fresado asfáltico e agregados virgens para bases de elevado desempenho (BSM – Bitumen Stabilized Material). O professor Lélio, Figura 201, apresentou a palestra intitulada ‘Avaliação de BSM como Base de Alto Desempenho: Resultados de Campo e Laboratório no LAPAV/UFRGS’, a qual está disponível no ANEXO XV, como forma de divulgação dos resultados finais do projeto.

Figura 201: Apresentação 3° SIREMA Prof. Lélio Brito

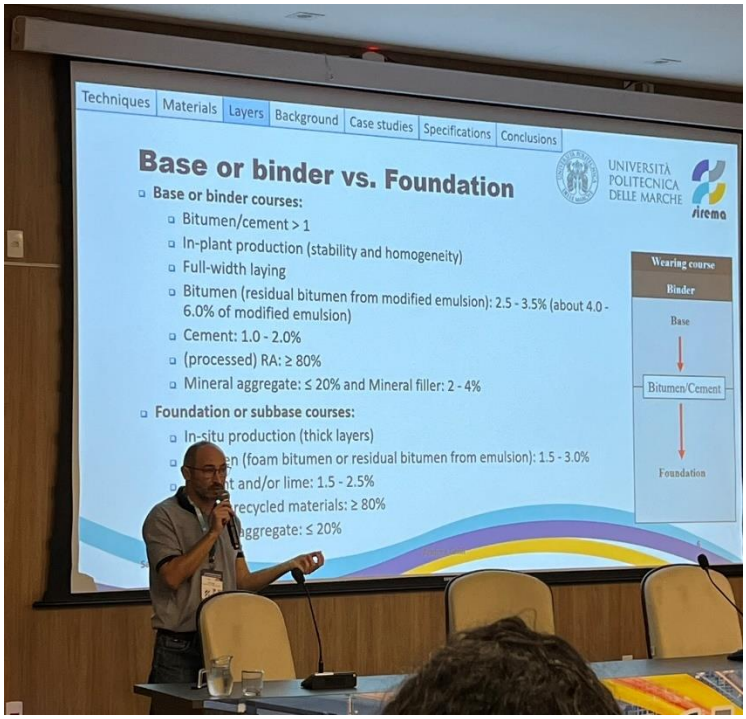


Ainda no tocante ao Simpósio, a fim de contribuir com a fim de contribuir especificamente com a temática, a convite do LAPAV/UFRGS o Dr. Andrea Grilli da Universidade Politécnica Del Marchi, Itália, que coordena o RILEM TC 308 -PAR TG1, voltado à padronização de ensaios de materiais reciclados com asfalto para disseminar os resultados fez também contribuições durante o evento como forma de colaboração na disseminação do conhecimento voltado à temática como forma de divulgação prevista no âmbito deste RDT.

O Professor Andrea apresentou a palestra intitulada “Cold Recycling in Italy: Research and Specifications for Eco-sustainable Road Pavements”, Figura 202, disponível no ANEXO XVI. Ressalta-se que a participação se deu no âmbito de contribuição aos estudos desenvolvidos.

Somado a isso, e aproveitando o deslocamento do professor, foi realizada uma vista a ECORODOVIAS, para estreitar os laços de cooperação entre o LAPAV/UFRGS

Figura 202: Apresentação 3° SIREMA Prof. Andrea Grilli



Adicionalmente, o Dr. Claudio Dias, Gerente de Pavimentação do Grupo ECORODOVIAS, proferiu a apresentação intitulada “Agenda ESG e Pavimentação: Estudo de Alternativas com Sustentabilidade Ambiental na ECORODOVIAS”, a qual está disponível no ANEXO XVII. Durante sua explanação, o Dr. Claudio abordou as questões relacionadas à Agenda ESG, que vêm sendo amplamente estudadas dentro do grupo, com destaque para a utilização de materiais asfálticos reciclados a frio estabilizados com emulsão asfáltica. Esta abordagem tem se mostrado promissora, oferecendo alternativas inovadoras e novas perspectivas para a implementação e aprimoramento das condições estruturais dos pavimentos, sem comprometer os aspectos ambientais. Além disso, enfatizou a significativa melhoria na capacidade mecânica dos materiais estabilizados, que têm demonstrado resultados altamente positivos. O Dr. Claudio também detalhou o estudo desenvolvido no RDT, conforme relatado neste trabalho, apresentando dados provenientes de ensaios realizados tanto em laboratório quanto em campo.

O 3º SIREMA, que é um evento organizado pela ABPv, na qual o Prof. Lélio atua como diretor técnico, em conjunto com a USP visou ser também um vetor de divulgação ampla de trabalhos na temática desta pesquisa e as 3 apresentações acima descritas foram realizadas como forma de divulgar o trabalho de RDT realizado, principalmente as pesquisas de Lelio Brito e Claudio Dias, ambos integrantes desta pesquisa.

Com sucesso o público-alvo composto por técnicos, acadêmicos, representantes de empresas do setor, estudantes e agentes governamentais, este evento, atendeu a uma das etapas propostas no RDT, que foi o de promover um workshop para a divulgação dos resultados do estudo, garantindo a participação de diversos entes da sociedade. A realização deste workshop permitiu uma ampla disseminação dos dados do estudo, consolidando a proposta de envolver diferentes setores na discussão e aplicação dos conhecimentos gerados, além de reforçar a relevância da interação entre a academia, o setor privado e as esferas governamentais.

5.5.3 Minuta de Norma

Somado aos esforços de divulgação da Norma a partir dos diferentes eventos, o grupo que compõem a equipe de trabalho do RDT “ESTUDO DE COMPÓSITOS DE CIMENTO, EMULSÃO COM FRESADO ASFÁLTICO E AGREGADOS VIRGENS PARA BASES DE ELEVADO DESEMPENHO”, vem participando ativamente do comitê de elaboração da norma NBR ABNT/ONS-034 PROJETO 034:000.001-010 intitulada “Misturas asfálticas — Reciclagem profunda a frio in situ com emulsão asfáltica” ao qual vem sendo elaborada pela Comissão do Asfalto ligada ao IBP.

Dentro do comitê, foi enviado sugestões de alteração e sugestões sobre os conhecimentos adquiridos ao longo do RDT para facilitar e melhorar os procedimentos da mesma. Durante a participação das reuniões, discussões de tempos de cura, metodologias a serem aplicadas e composição do material estão sendo abordadas e corroboradas com os conhecimentos adquiridos sobre o material.

Contudo, mesmo participando ativamente do processo de elaboração da norma brasileira, o presente trabalho tem como objetivo definir uma minuta de norma para ser apresentada para o

DNIT. Para isso, encaminhou-se ao DNIT IPR uma sugestão de minuta de norma, disponibilizada no ANEXO XVIII, intitulada “Dosagem de Misturas Recicladas a Frio com Emulsão Asfáltica para Camadas de Base e Sub-base”, ao qual descreve um método de ensaio para a dosagem de materiais reciclados do tipo BSM. A minuta de norma teve como finalidade propor um método de dosagem para o material, trazendo os conhecimentos obtidos ao longo do RDT. Seguiu-se o TG2 da República da África do Sul como o principal material de apoio para embasamento da norma. Ressalta-se ainda, que existem lacunas a serem respondidas bem como normatizadas, como Especificações de serviço para execução, controle em campo e parâmetros para liberação ao tráfego e pagamento, pois o material ganha resistência com o tempo. Ainda, há lacunas quanto há outros métodos de dosagem, utilizando o compactador giratório Superpave e Marshall.

A presente proposta de norma está sendo enviada concomitantemente à ANTT e DNIT para que as sugestões sejam propostas e as melhorias realizadas. Esta é uma temática latente, como diversas frentes discutindo o trabalho e, portanto, merece a devida atenção a partir da proposta realizada. Entende-se que ainda haverá passos a serem dados derivado da proposta apresentada e que poderá, portanto, alterar a referida minuta, sem prejuízo da entrega prevista que contempla o conhecimento adquirido pela equipe de trabalho ao longo da pesquisa de RDT.

5.5.4 Participação em Eventos

Ao longo do segundo semestre de 2024, correspondente ao quarto relatório, participou-se de dois eventos acadêmicos para apresentação de trabalhos que foram desenvolvidos no âmbito do RDT e relacionados a materiais reciclados a frio estabilizados com emulsão asfáltica.

O primeiro trabalho foi apresentado por Igor Sieczkowski Moreira intitulado no 26º Encontro Nacional de Conservação Rodoviária (ENACOR) e 49ª Reunião Anual de Pavimentação (RAPv), realizado na cidade de Aracaju/SE. O trabalho intitulado “IMPACTOS AMBIENTAIS DA PRODUÇÃO DE MATERIAIS ESTABILIZADOS COM EMULSÃO DE ASFALTO”, disponível no ANEXO XIX, abordou o impacto gerado pela utilização de uma mistura do tipo BSM aplicada a um trecho experimental no sul do Brasil. A Figura 203 traz a apresentação do trabalho no evento, ao qual está disponível no ANEXO XX.

Figura 203: Apresentação Igor 49° RAPv



Ainda no 26° ENACOR e 49° RAPv foi publicado o trabalho intitulado “EFEITO DA INCORPORAÇÃO DE RAP NA RESISTÊNCIA À TRAÇÃO INDIRETA DE MISTURAS DO TIPO BSM ESTABILIZADAS COM EMULSÃO ASFÁLTICA”, sendo o mesmo apresentado pelo Prof. Washington Peres Núñez. O ANEXO XXI disponibiliza o trabalho. A Figura 204 traz o prof. Washington Peres Núñez realizando a apresentação do trabalho.

Figura 204: Apresentação 49° RAPV prof. Washington Peres Núñez



Ainda, decorrente o artigo “IMPACTOS AMBIENTAIS DA PRODUÇÃO DE MATERIAIS ESTABILIZADOS COM EMULSÃO DE ASFALTO” o mesmo foi convidado para ser publicado na 26° edição da Revista Estradas ISSN 1807-426X. O ANEXO XXII disponibiliza a publicação na revista.

Em novembro de 2024, nos dias 04 a 08, realizou-se o 38° Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes – ANPET, na cidade de Florianópolis/SC. No evento foi apresentado pelo Prof. Lélio Brito e publicado o artigo intitulado “MISTURAS DO TIPO BSM SUBMETIDAS À COMPACTAÇÃO VIBRATÓRIA: VARIAÇÃO DO PARÂMETRO ITS AO LONGO DA PROFUNDIDADE”, ao qual está disponível no ANEXO XXIII. A Figura 205, traz o prof. Lélio apresentando o trabalho.

Figura 205: Apresentação trabalho 38° ANPET Prof. Lélio Brito



No relatório parcial 3, realizou-se a participação no XXII Congresso Ibero Latinoamericanos del Asfalto – CILA na cidade de Granada na Espanha. Como a disponibilização dos anais do congresso foram realizadas somente no segundo semestre do ano de 2024, disponibiliza-se no ANEXO XXIV o artigo intitulado “IMPACTO DO TEMPO DE CURA NOS PARÂMETROS DE RESISTÊNCIA DE MISTURAS ESTABILIZADAS COM EMULSÃO ASFÁLTICA TIPO BSM”

5.6 Quadro Resumo – Atividades Previstas x Desenvolvidas

Atividades Previstas	**Produtos Esperados**	**Atividades Executadas**	**Status das Atividades Executadas**	**Produtos Gerados**
Análise de dados	- Relatório	Etapa Análise de dados	Concluídas	- Relatório -Artigo científico
Minuta, Norma ou instrução de Serviço	- Relatório	Minuta, Norma ou instrução de Serviço	Concluídas	- Relatório - Participação de Reuniões - Participação em Eventos
Elaboração de relatórios	- Relatório	Elaboração de relatórios	Concluídas	- Relatório
Workshop	- Evento de divulgação - Relatório	Workshop	Concluídas	- Relatório - Participação em Eventos

6. CONCLUSÕES, CONSIDERAÇÕES FINAIS E PRODUTOS GERADOS

Os objetivos estabelecidos para o presente trabalho foram plenamente alcançados, evidenciando que a utilização de materiais estabilizados a frio do tipo BSM (*Bitumen Stabilized Material*) pode ser amplamente viável para aplicação em bases e sub-bases rodoviárias. As avaliações de diferentes parâmetros e diferentes materiais, aplicados em diferentes anos, com características e composições diferentes, que vem sendo monitorados apresentam um bom desempenho estrutural satisfatório, comprovando a eficácia e a versatilidade deste tipo de material.

Atrelado a isso, a verificação e obtenção de parâmetros e técnicas para a obtenção de novas composições e materiais em laboratório, contribuiu significativamente para o conhecimento e desenvolvimento da técnica de dosagem, desmistificando vários pontos que no início do projeto estavam incertos e necessitaram ser compreendidos, estudados, modificados e melhorados.

Os resultados obtidos também indicaram que os materiais BSM apresentam ganho progressivo de resistência com o tempo, fator que eleva o desempenho estrutural dessas misturas. Ao analisar a variação das cargas, percebe-se que o material, mesmo com composições diferentes apresenta uma não linearidade e possui influência da variação sazonal. Isso, deve-se, principalmente, à presença de fresado asfáltico e emulsão asfáltica em sua composição.

A ação de aglutinação do cimento não é suficiente para modificar o comportamento mecânico destes materiais quando utilizado em baixos teores, sendo sua atuação mais fortemente explicada como fíler. Quando elevamos os teores de cimento, começa-se a ter uma modificação do material, passando a ter um comportamento de material cimentado, não sendo o objeto de estudo deste trabalho. Contudo, a presença de fíler auxilia significativamente nos processos de cura, enchimento e rompimento da emulsão asfáltica, sendo também possível a sua substituição por cinza ou cal.

Foi constatado que a variação de teores de cimento em pequenas proporções não contribui para o aumento significativo da resistência mecânica, reforçando que sua função principal é atuar como material de enchimento e auxiliar no processo de cura da mistura, sem promover a cimentação do material.

A partir das análises de LCCA, identificou-se que o principal gargalo ambiental está relacionado ao impacto gerado pelo transporte dos materiais, especialmente considerando as simulações baseadas na produção em usina. Entretanto, o passivo ambiental total associado ao uso de materiais

estabilizados a frio é significativamente menor quando comparado à produção de misturas asfálticas tradicionais, evidenciando suas vantagens em termos de sustentabilidade.

O acompanhamento da pista experimental construída no LAPAV evidenciou o comportamento dos materiais BSM em ensaios de deformação permanente acelerada em escala real. Esses resultados contribuíram para o aprimoramento de técnicas de dimensionamento e monitoramento, consolidando o papel do material dentro da Rede Temática de Asfalto (RTA), em parceria com a Petrobras.

Além dos avanços técnicos, este trabalho resultou em uma ampla disseminação dos resultados e conhecimentos adquiridos. Publicações em revistas técnicas nacionais e internacionais, bem como apresentações em congressos e eventos renomados, como o 3º SIREMA, a PAVING EXPO 2023 e o I Simpósio de Engenharia em Pelotas/RS, contribuíram para o fortalecimento da técnica no cenário técnico e científico.

Em síntese, o conjunto de esforços empreendidos em laboratório, campo e disseminação técnica solidifica o papel das misturas estabilizadas a frio como uma alternativa sustentável e eficiente para a construção e reabilitação de pavimentos rodoviários, promovendo o avanço contínuo no setor de infraestrutura viária.

A participação na elaboração da norma ABNT em fase de estudo e a proposta da minuta de norma ao DNIT, vem de encontro a ampliação e disseminação da técnica de reciclagem de pavimentos a frio com emulsão asfáltica.

A Tabela 47 apresenta os produtos gerados no presente RDT ao longo dos dois anos do projeto. Esse registro possibilita uma visão clara do impacto e relevância das atividades realizadas, bem como dos métodos e técnicas aplicados, fornecendo uma referência sólida para a futura continuidade da Pesquisa.

Tabela 47: Produtos Gerados pelo RDT ECOSUL

Produtos Gerados	Item
I - Relatórios Semestrais de Atividades	Item 2; 3; 4 e 5
II - Participação em congressos	Itens 3.5.4.1; 4.5.5
III - Artigos científicos publicados	Itens 2.5.4; Anexo III; Anexo IV; Anexo XI; Anexo XIX; Artigo XXII; Artigo XXIII; Artigo XXIV
IV - Apresentação de Artigos Científicos em eventos	Anexo V; Anexo XI; Anexo XX
V -Apresentação das atividades desenvolvidas pelo programa através de painéis no Workshop de RDT anualmente realizado pela ANTT	Itens 3.5.4.3 e 4.5; Anexo XIV; Anexo VIII
VI - Avanço na quantificação da sustentabilidade de técnicas	Itens 3.5.3; 4.5.2; 5.5.1
VII - Divulgação de resultados	Itens 3.5.4.2; 5.5.2; Anexo XII; Anexo XIII
VII - Minuta de Norma Técnica	Itens 4.5.3; 5.5.3; Anexo XIII
VIII - Workshop	Itens Anexo VI; Anexo VII; Anexo XV; Anexo XVI; Anexo XVII
IX - Mestrado	Anexo III; Anexo IV; Anexo XI; Anexo XIX; Artigo XXII; Artigo XXIII; Artigo XXIV
X - Doutorado	Anexo III; Anexo IV; Anexo XI; Anexo XIX; Artigo XXII; Artigo XXIII; Artigo XXIV
XI - Pós doutorado	Anexo III; Anexo IV; Anexo XI; Anexo XIX; Artigo XXII; Artigo XXIII; Artigo XXIV
XII – Iniciação cientifica	Anexo IV e Anexo V

Entre os principais resultados alcançados neste projeto, destaca-se a elaboração de uma minuta de norma, que será submetida ao DNIT para apreciação. Além disso, o projeto contribuiu para a participação ativa na formulação da norma brasileira da ABNT relacionada ao FDR (*Full Depth Reclamation*), reforçando sua relevância técnica e científica. Paralelamente, houve uma ampla difusão dos conhecimentos gerados, abrangendo diferentes setores da sociedade, incluindo a

academia, concessionárias e órgãos governamentais, fortalecendo o entendimento e a aplicação dessa tecnologia em diversas esferas.

A Tabela 48 apresenta a identificação no relatório final dos itens identificados no cronograma físico financeira, sendo todos concluídos com ênfase.

Tabela 48: Identificação dos elementos no relatório

Elementos	Item	Situação
Etapa de Laboratório	Itens 2.5.2 e 3.5.1	Concluído
Etapa de Campo	Itens 2.5.3; 3.5.2 e 4.5.1	Concluído
Análise de Dados	Itens 3.5.3; 4.5.2 e 5.5.1	Concluído
Minuta de Norma	Itens 4.5.3 e 5.5.2	Concluído
Workshop	Itens 4.5.4 e 5.5.3	Concluído
Elaboração de Relatórios	Itens 2; 3; 4 e 5	Concluído

Concluiu-se que o trabalho "*Estudo de compósitos de cimento, emulsão com fresado asfáltico e agregados virgens para bases de elevado desempenho"* teve importância fundamental para o avanço do conhecimento técnico-científico. Este estudo contribuiu significativamente para o desenvolvimento de uma metodologia de dosagem, compreensão das propriedades do material e ampla divulgação da técnica. Além disso, reforçou o potencial da metodologia como uma alternativa sustentável e eficiente para a recuperação e reabilitação de pavimentos rodoviários por meio da reciclagem de materiais e sua estabilização com emulsão asfáltica.

7. REFERÊNCIAS

AASHTO. TP 107: Standard Method of Test for Determining the Damage Characteristic Curve and Failure Criterion Using the Asphalt Mixture Performance Tester (AMPT) Cyclic Fatigue Test. [*s. l.*], v. 3, 2018.

ABEDA. Manual básico de emulsões asfálticas. **Manual básico de emulsões asfálticas - Soluções para pavimentar sua cidade**, [*s. l.*], v. 2ª ed., p. 144, 2010.

ABNT. NBR 14249 Emulsão asfáltica catiônica – Determinação expedita da resistência à água (adesividade) sobre agregados graúdos. [*s. l.*], p. 14249, 2007.

ABNT. NBR 14949: Microrrevestimentos asfálticos - Caracterização da fração fina por meio da absorção de azul de metileno . **Associação Brasileira de Normas Técnicas**, [*s. l.*], p. 16, 2017.

ABNT. **NBR 6300: Emulsões asfálticas catiônicas — Determinação da resistência à água (adesividade) em agregados graúdos Asphalt**. Rio de Janeiro: [*s. n.*], 2009.

ABNT. **NBR 6457: Amostras de solo — Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização**. Rio de Janeiro: [*s. n.*], 2016.

ABNT. NBR 7182: Solo — Ensaio de compactação. **Associação Brasileira de Normas Técnicas**, [*s. l.*], p. 9, 2020.

ANP. **CARACTERISTICAS DAS EMULSÕES ASFÁLTICAS PARA SERVIÇOS DE RECICLAGEM DE REVESTIMENTO, RECICLAGEM PROFUNDA E ESTABILIZAÇÃO**. [*S. l.: s. n.*], 2022.

ANTT. AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE MISTURAS ASFÁLTICAS COM LIGANTE MODIFICADO POR BORRACHA USINADAS A TEMPERATURAS INTERMEDIÁRIAS E DE BASES NEGRAS USINADAS COM EMULSÃO ASFÁLTICA. [*s. l.*], p. 1–91, 2020.

ARRA. Recommended Construction Guidelines For Cold Central Plant Recycling (CCPR) Using Bituminous Recycling Agents CR102. [*s. l.*], v. 21401, n. 410, 2023.

ARRA. Recommended Construction Guidelines For Full Depth Reclamation (FDR) Using Bituminous Stabilization FDR101. [*s. l.*], v. 60137, n. 630, 2017. Disponível em: www.ARRA.org.

ARRA. Recommended Mix Design Guidelines For Cold Recycling Using Emulsified Asphalt Recycling Agent CR201. **Asphalt Recycling & Reclaiming Association**, [*s. l.*], v. 60137, n. 630, 2023.

ARRA. Recommended Mix Design Guidelines For Cold Recycling Using Foamed (Expanded) Asphalt Recycling Agent (CR202). **Asphalt Recycling & Reclaiming Association**, [*s. l.*], v. 60137, n. 630, 2017. Disponível em: www.ARRA.org.

ARRA. Recommended Mix Design Guidelines For Full Depth Reclamation (FDR) Using Cement or Cement Kiln Dust (CKD) Stabilizing Agent FDR202. [*s. l.*], v. 60137, n. 630, 2016. Disponível em: www.ARRA.org.

ARRA. Recommended Mix Design Guidelines For Full Depth Reclamation (FDR) Using Emulsified Asphalt Stabilizing Agent FDR201A. [*s. l.*], v. 60137, n. 630, 2018. Disponível em: www.ARRA.org.

ARRA. Recommended Mix Design Guidelines For Full Depth Reclamation (FDR) Using Emulsified Asphalt Stabilizing Agent FDR201A. [*s. l.*], v. 60137, n. 630, 2023. Disponível em: www.ARRA.org.

ASPHALT ACADEMY. **Technical Guideline: Bitumen Stabilised Materials**. [*S. l.: s. n.*], 2009. v. 2

ASTM. ASTM D 3625: Effect of Water on Bituminous-Coated Aggregate Using Boiling Water. **Source**, [*s. l.*], v. 96, n. Reapproved, p. 1–2, 2005.

BALBO, José Tadeu. **Pavimentação Asfáltica: materiais, projeto e restauração**. 1. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2016.

BERNUCCI, Liedi Bariani *et al.* **Pavimentação Asfáltica: Formação Básica para Engenheiros**. 2°ed. Rio de Janeiro: Petrobras, 2022.

BOEIRA, Fernando Dekeper *et al.* Design and implementation of direct tension-compression fatigue testing apparatus for damage evaluation in hot mix asphalt. **Revista Materia**, [*s. l.*], v. 23, n. 3, 2018.

BONFIM, Valmir. **Pavimento Sustentável**. são Paulo: Exceção Editorial, 2021.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. DNIT 180: Pavimentação - Misturas asfálticas - Determinação do dano por umidade induzida – Método de Ensaio. **Departamento Nacional De Infraestrutura De Transportes**, [*s. l.*], p. 9, 2018.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Pavimentação - reciclagem de pavimento a frio “in situ” com espuma de asfalto - Especificação de Serviço: DNIT 166/2013-ES**. Rio de Janeiro: [*s. n.*], 2013.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Pavimentação**

- Reciclagem de pavimento em usina com espuma de asfalto - Especificação de Serviço: DNIT 169/2014 - ES. Rio de Janeiro: [*s. n.*], 2014.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Pavimentação - Reciclagem profunda de pavimentos in situ com adição de cimento Portland - Especificação de Serviço: DNIT 167/2013-ES**. Rio de Janeiro: [*s. n.*], 2013.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT). **NORMA DNIT 416/2019 - ME: Pavimentação asfáltica – Misturas asfálticas – Determinação do módulo dinâmico – Método de ensaio**. Rio de Janeiro: [*s. n.*], 2019.

DIAS, Cláudio Renato Castro *et al.* Bitumen stabilized materials as pavement overlay: Laboratory and field study. **Construction and Building Materials**, [*s. l.*], v. 369, n. January, 2023.

DNER. **DNER-ME 092: Solo- determinação da massa específica aparente "in situ", com emprego ido frasco de areia,**. Porto Alegre: [*s. n.*], 1994.

DNIT. DNIT 164/2013-ME: Solos - Compactação utilizando amostras não trabalhadas. [*s. l.*], p. 1–7, 2013.

FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION. LTPP Manual for Falling Weight Deflectometer Measurements. **Long-Term Pavement Performance Team, HRDI-13 Federal Highway Administration**, [*s. l.*], v. 22101, n. August, p. 1–100, 2000.

FEDRIGO, William. **RECICLAGEM DE PAVIMENTOS COM ADIÇÃO DE CIMENTO PORTLAND: DEFINIÇÃO DAS BASES PARA UM MÉTODO DE DOSAGEM**. 2015. - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, [*s. l.*], 2015.

GRAZIANI, Andrea *et al.* Effect of curing on the physical and mechanical properties of cold-recycled bituminous mixtures. **Materials and Design**, [*s. l.*], v. 95, p. 358–369, 2016. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2016.01.094.

GRECA. **Recycla RS - serviços de reciclagem super cial Recycla RP - serviços de reciclagem profunda**. [*S. l.*], 2023. Disponível em: https://www.grecaasfaltos.com.br/recycla/. Acesso em: 1 maio 2023.

ISO - INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 21930 - Sustainability in buildings and civil engineering works — Core rules for environmental product declarations of construction products and services**. [*S. l.: s. n.*], 2017.

MALYSZ, Rodrigo. **Comportamento mecânico de britas empregadas em pavimentação**. 2004. 158 f. - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, [*s. l.*], 2004.

MOLLENHAUER, Konrad *et al.* Cold recycled asphalt for pavements with optimized resource and Cold recycled asphalt for pavements with optimized resource and energy efficiency : proposal for harmonized mix and pavement energy efficiency : proposal for harmonized mix and pavement desig. **Transportation Research Procedia**, [*s. l.*], v. 72, n. 2022, p. 3031–3038, 2023. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.trpro.2023.11.851.

MONDAL, Purbayan Ghosh; KUNA, Kranthi K. **Mix design considerations for foamed bitumen stabilized materials: A review**. [*S. l.*]: Elsevier Ltd, 2022.

MOTTA, Laura Maria Goretti da *et al.* **Pavimentação ASfaltica: Formação Básica para Engenheiros**. 2 ed.ed. Rio de Janeiro: PETROBRAS: ABEDA, 2022.

SABITA. **Technical Guideline (TG2) : Bitumen Stabilised Materials Southern African Bitumen Association (Sabita)**. 3°ed. [*S. l.: s. n.*], 2020.

WIRTGEN, GmbH. Wirtgen Cold Recycling Technology. **Wirtgen group company**, [*s. l.*], p. 370, 2012.

WIRTGEN GROUP. **Reciclagem a frio: Tecnologia de reciclagem a frio Wirtgen**. [*S. l.: s. n.*], 2012. Disponível em: www.wirtgen.com.

YAN, Jinhai *et al.* Early-age strength and long-term performance of asphalt emulsion cold recycled mixes with various cement contents. **Construction and Building Materials**, [*s. l.*], v. 137, p. 153–159, 2017. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.01.114.

8. ANEXOS

ANEXO I

(Controle de Compactação – Método do Frasco de Areia – BR-116/RS km 495+360 a BR-116/RS km495+ 540)

ecoSUL

Massa Especifica "IN SITU" Método Virginia Departamento Higways

CBR (2,069) 7,30%

BR 116

TRECHO **CAMAQUÃ**

ecoRODOVIAS CONCESSÕES

DATA	FRESADO			08/01/23									
16/04/20	KM	POSIÇÃO		SUL	SUL	SUL	SUL	SUL	SUL	SUL			
		Estaca		495+330	495+430	495+400							
	Nº de Furos			*1*	*2*	*3*	*4*	*5*	*6*	*7*			
VOLUME	(A) Peso do Frasco Antes		g	11668	8412	6944							
VOLUME	(B) Peso do Frasco Depois		g	7931	4354	3395							
VOLUME	(C) Peso da areia deslocada	A-B	g	3737	4058	3549							
VOLUME	(D) Peso da areia no cone band.	fornec.	g	1365	1365	1365							
VOLUME	(E) Peso da areia na cavidade	C-D	g	2372	2693	2184							
VOLUME	(F) M.E.da areia do (Laborat.)	fornec.	g/cm^3	1349	1349	1349							
VOLUME	(G) Volume do solo		cm^3	1,758	1,996	1,619							
peso	(H) Peso do solo Úmido + tara		g	3886	4460	3604							
peso	(I) Tara		g										
peso	(J) Peso do solo úmido		g	3886	4460	3604							
UMIDADE	(K) Peso do solo úmido		g	172,6	175,2	154,4							
UMIDADE	(L) Peso do solo seco		g	161,1	163	144,6							
UMIDADE	(M) Peso da água	K-L	g	11,5	12,2	9,8							
UMIDADE	(N)% da umidade	M/L*100	%	7,1	7,5	6,8							
UMIDADE	Espessura		cm	12	13	13							
CAMPO	(1) M.E.A. material úmido	J / G	g/cm^3	2210	2234	2226							
CAMPO	(2) M.E.A. mat.seco	1/(100+N)	g/cm^3	2,063	2,079	2,085							
CAMPO	(3) M.E.Real retido na 3/4"	fornec.	g/cm^3	2641	2641	2641							
CAMPO	(4) Peso do material retido 3/4"		g	563	1206	341							
CAMPO	(5) Material retido na 3/4"	4 / J	dec	0,145	0,270	0,095							
CAMPO	(6) Material passando 3/4"	1,000 - 5	dec	0,855	0,730	0,905							
CAMPO	(7) Calcular	2 / 3 -1000	-	0,922	0,921	0,921							
CAMPO	(8) Calcular	5 * 7 - 1000	-	0,866	0,751	0,913							
CAMPO	(9) M.E.Material seco corrigido	2 * 6 / 8	g/cm^3	2,036	2,020	2,068							
CAMPO	(10) M.E. Material seco (laborat.)	fornec.	g/cm^3	2061	2061	2061							
CAMPO	(11) Grau de compactação			98,8	98,0	100,3							

ANEXO II

(Controle de Compactação – Método do Frasco de Areia – Pista F)

QualiCon
Consultoria e Tecnologia

Controle de Compactação
Método Frasco de Areia (NBR 7185)

CERTIFICADO
Nº: 15-007-444-B -2022

INTERRESSADO :	DDD Engenharia	CC:	444-B
OBRA:	LAPAV / UFRGS		
ENDEREÇO:	Av.Bento Gonsalves,9500 - Agronomia,Porto Alegre/RS		
DESCRIÇÃO DA AMOSTRA:	Fresado		
LOCAL:			

DENSIDADE - MÉTODO DO CONE DE AREIA

REGISTRO Nº		7-1	7-2			
ESTACA						
POSIÇÃO (D-E-C)		POA	Viamão			
DISTÂNCIA DO EIXO (m)						
ESPESSURA DA CAMADA (cm)		15,0	15,0			
Nº DA CAMADA		Base	Base			

DETERMINAÇÃO DE DENSIDADE

1. PESO APARELHO + AREIA	(kg)	7,880	7,730			
2. PESO APARELHO + RESTO AREIA	(kg)	4,110	3,955			
3. PESO DA AREIA CONSUMIDA	(kg)	3,770	3,775			
4. PESO DA AREIA DO CONE	(kg)	0,870	0,870			
5. PESO DA AREIA NA CAVA	(kg)	2,900	2,905			
6. DENSIDADE DA AREIA	(kg/dm³)	1,460	1,460			
7. VOLUME DA CAVA	(dm³)	1,986	1,990			
8. PESO DO SOLO ÚMIDO ESCAVADO	(kg)	4,395	4,560			
9. DENS. APARENTE ÚMIDA	(kg/dm³)	2,213	2,292			
10. DENS. APARENTE SECA	(kg/dm³)	2,040	2,171			

DETERMINAÇÃO DE UMIDADE

Nº DO RECIPIENTE	(nº)	1	2			
PESO DO SOLO ÚMIDO	(g)	385,0	285,0			
PESO DO SOLO SECO	(g)	355,0	270,0			
ÁGUA	(g)	30,0	15,0			
UMIDADE	(%)	8,5	5,6			

GRAU DE COMPACTAÇÃO

DENS. AP. SECA DE CAMPO	(kg/dm³)	2,040	2,171			
DENS. MÁXIMA DE LABORATÓRIO	(kg/dm³)	2,069	2,069			
UMIDADE DE LABORATÓRIO	(%)	7,90	7,90			
GRAU DE COMPACTAÇÃO	(%)	98,6	104,9			

Observações:

Situação Final

☐ Aprovado ☐ Não Aprovado (Não conforme)

Caso seja Não Conforme

Disposição dada: ☐ Correção/Retrabalho (1) ☐ Descarte ☐ Aceito sob Concessão
☐ Outro: _____

Considerações:

Reverificação (1) ☐ Aprovado ☐ Não Aprovado **Data** _____

Responsável:

Wagner M. Marques
Engenheiro Civil
CREA/RS 234832

11/01/2023

Setor de Engenharia - Qualicon — DATA

Laboratório Central – Engenheiro Ubatuba de Faria, 105 – Sarandi – Porto Alegre – RS – CEP: 91130-070
Fone: (51) 4061.6001 / (51) 98187.7623 – qualicon@qualicontecnologia.com.br

ANEXO III

(Bitumen stabilized materials as pavement overlay: Laboratory and field study)

Construction and Building Materials 369 (2023) 130562

Contents lists available at ScienceDirect

Construction and Building Materials

journal homepage: www.elsevier.com/locate/conbuildmat

Bitumen stabilized materials as pavement overlay: Laboratory and field study

Cláudio Renato Castro Dias, Washington Peres Núñez, Lélio Antônio Teixeira Brito, Marlova Grazziotin Johnston, Jorge Augusto Pereira Ceratti, Leonardo Lunkes Wagner, William Fedrigo *

Postgraduate Program in Civil Engineering: Civil Construction and Infrastructure, Federal University of Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brazil

ARTICLE INFO

Keywords:
Bitumen stabilized material
RAP
Cement
Base course
Overlay
Rutting

ABSTRACT

Bitumen stabilized materials applied as base courses have been used in many countries. In the southern Brazilian State of Rio Grande do Sul, two test sections were built using such mixes (in 2011 and 2015) as overlay asphalt emulsion base courses and have been under monitoring since then. In 2019, a new test section was built to evaluate mixes of granular materials and reclaimed asphalt pavement stabilized with emulsion and Portland cement as overlay base courses. The main objective of the research reported here was to evaluate the mechanical behavior of such materials and to assess their performance in the field during the years after construction. Indirect tensile strength, monotonic triaxial, and repeated load triaxial tests were carried out to obtain the necessary mechanical parameters. The data collected during the monitoring of the test sections were used to analyze the field performance in terms of permanent deformation. Besides, in situ moduli were obtained using backanalysis of deflection basins. The number of equivalent single axle loads (ESALs) for the analysis period was computed using data collected in toll plazas near the test sections. Using field and laboratory results and the South African TG2 performance model, it was possible to estimate the life of the studied pavements regarding permanent deformation. The TG2 model seems to underestimate the life of pavements with thick (>40 mm) asphalt layers. A model relating rutting to the number of ESALs was obtained, allowing the prediction of rutting of asphalt pavements overlaid by a bitumen stabilized base layer and asphalt wearing courses. Considering the test sections' performances, the mixes proved to be efficient to improve structural capacity, also reducing the influence of the water level variation on pavement performance.

1. Introduction

The South of the Brazilian State of Rio Grande do Sul is characterized by a cold and rainy winter, from May to September. The rainfalls raise the groundwater, which may cause excessive moisture inside the pavement.

To improve structural performance and reduce the susceptibility to damage caused by excessive moisture, two test sections were built, in 2011 and 2015, applying permeable base courses stabilized with asphalt emulsion over existing pavements. These base layers were then covered by a new asphalt wearing course. The sections are located on Brazilian Highways BR-392 and BR-116. The mix design was based on research reported by Lovering and Cedergren [1], as well as on the Brazilian (National Department of Transport Infrastructure – DNIT) and US experiences. California Department of Transportation (CALTRANS) used to design this type of asphalt base course, named Asphalt Treated Permeable Base (ATPB). It was found that such a mix increased permanent deformation and caused stripping under saturated conditions. Despite that unattended performance, the ATPB performed better than unbound aggregates bases, traditionally used in Brazil and elsewhere [2].

In 2019, a new test section was built on Highway BR-116. The new overlay base course was built with a mix made of aggregates, reclaimed asphalt pavement (RAP), asphalt emulsion, and Portland cement. In this case, the mixture was designed based on the South African experience. Such mixes, with or without recycled materials, are called Cold Bituminous Emulsion Mix (CBEM) and Cement Emulsion Treated Mix (CETM). CBEM was used in the 2011 and 2015 test sections, while CETM

* Corresponding author.
E-mail address: william.fedrigo@ufrgs.br (W. Fedrigo).

https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.130562
Received 20 September 2022; Received in revised form 8 January 2023; Accepted 27 January 2023
Available online 3 February 2023
0950-0618/© 2023 Elsevier Ltd. All rights reserved.

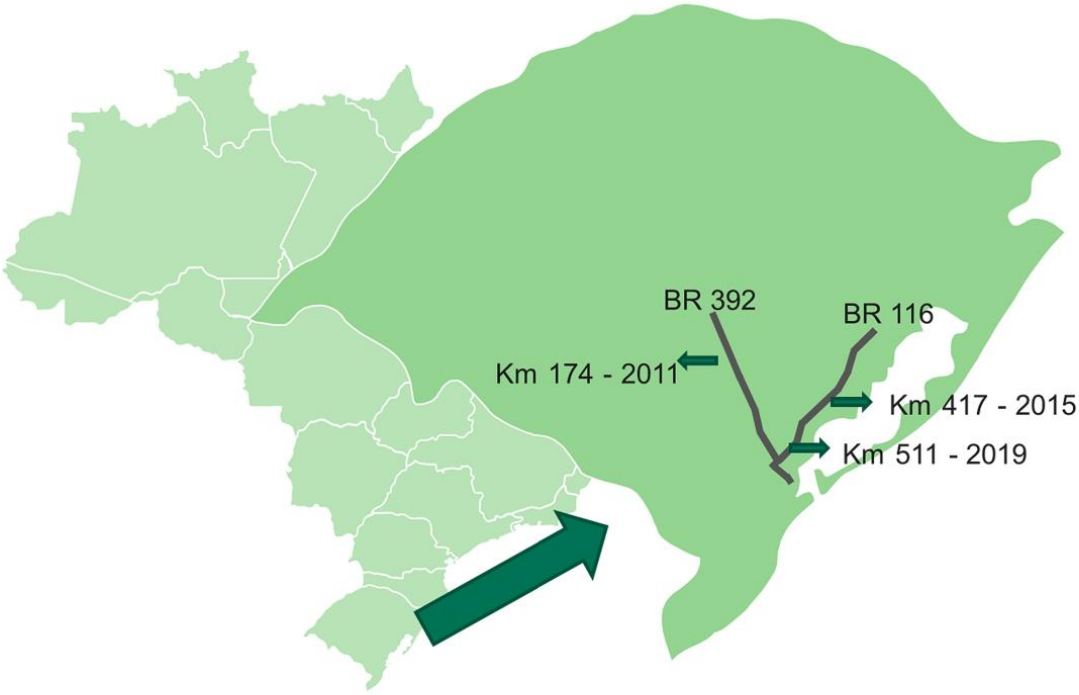


Fig. 1. Test sections' sites.

was used in the 2019 section.

Results of previous research have shown an increase in resilient modulus and reduction of permanent deformation for both types of emulsion mix when compared to unbound aggregates [3–5]. The emulsion is responsible for increasing the mix cohesion and the resistance to moisture damage, besides providing flexibility, which helps to minimize the risk of shrinkage cracking due to the possible inclusion of cement. Cement is responsible for creating hydraulic bonds, further increasing resistance to moisture damage and providing initial strength to traffic [6–8].

Orosa et al. [9] state that there are two phases in the mechanical behavior of bitumen stabilized mixes. First, in the curing phase, the mixes show an apparent nonlinear elastic behavior similar to that of granular materials, which are stress-dependent. In the second phase, the behavior becomes increasingly viscoelastic and is characterized by a dependence on temperature and loading frequency, resembling a traditional hot mix asphalt. Therefore, the behavior of such materials is intermediate between a hot mix asphalt and a granular material, and the analysis using triaxial tests is considered adequate, mainly when the binder content is low, presenting predominantly granular behavior with a stress-dependent response. Likewise, several other authors also reported that bitumen stabilized mixes show stress-dependent behavior [10–12].

Other researchers studied the temperature-dependent behavior of such materials [13–15] and stated that the time–temperature superposition principle is valid as well as the experimental and analytical approach adopted for asphalt mixes [16]. In a recent study, Mignini et al. [17] investigated the complex modulus of cement-bitumen treated materials produced with different reclaimed asphalt gradations. They showed that gap graded mixtures achieved higher modulus than dense graded mixtures, which could be related to an improved stone-to-stone contact.

Furthermore, previous research also indicated that mix composition, compaction method, matric suction, and the residual asphalt in RAP might affect the behavior of bitumen stabilized mixes [18–21]. Regarding the bond between emulsion and RAP aggregates, Cardone et al. [22] found a good affinity between the residual asphalt and the RAP aged asphalt film regardless of aggregate nature, curing conditions, and conditioning environment.

The previous mentioned researches show that, although complex in nature, the laboratory behavior of bitumen stabilized materials is relatively well-known and even a synthesis of standards and procedures for specimen preparation and in-field evaluation of such materials was published [23]. Moreover, Mondal and Kunak [24] reported that there are also different mix design and structural design methods for bitumen stabilized layers, and it depends mainly on the binder content. For instance, the South African experience is based only on permanent deformation. Conversely, the Australian experience considers relatively high stiffnesses, which leads to higher asphalt contents than other methods and makes such materials susceptible to fatigue cracking besides permanent deformation.

Although several works on cold recycled materials, in general, are reported in the literature [25–28], there is also a lack of studies on the field performance of bitumen stabilized materials [11,29–32], especially those relating field to laboratory data and reporting the long-term performance of test sections. Furthermore, there is a knowledge gap on using bitumen stabilized materials as pavement overlays on old asphalt pavements. In most cases, these materials are produced in situ using a recycling machine and incorporate the asphalt and base courses, demonstrating the novelty of the research reported here.

Considering this knowledge gap, the objective of the present research was to evaluate the mechanical behavior of bitumen stabilized materials



Fig. 2. Test section of 2011 (BR-392, km 174 + 300 to 175 + 000): (a) before; (b) CBEM layer; (c) cape seal; and (d) asphalt layer.



Fig. 3. Test section of 2015 (BR-116, km 417 + 400 to 417 + 600): (a) before; (b) CBEM placement; (c) cape seal; and (d) asphalt layer.

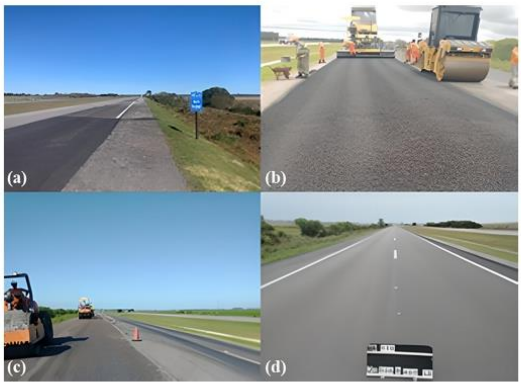


Fig. 4. Test section of 2019 (BR-116, km 506 + 000 to 507 + 000): (a) before; (b) CETM placement; (c) CETM compaction; and (d) asphalt layer.

in the laboratory and to relate such behavior with the results obtained through the monitoring of test sections' performance where those materials were applied as an overlay on old asphalt pavements.

To achieve the objective of the research, the experimental program was divided into four steps: 1) Carrying out indirect tensile test, monotonic triaxial, and repeated load triaxial tests, using the mixes that were applied in the test sections; 2) Analyzing data from monitoring, deflections, and surface conditions to estimate in situ modulus of each layer and follow rutting evolution during the period of analysis; 3) Computing the number of equivalent single axle loads (ESALs) for the periods of analysis, using data collected in toll plazas located near the test sections; 4) Comparing the results of mechanistic-empirical (M-E) analysis, using the South African model for bitumen stabilized materials (TG2 [33]), with the field performance.

2. Test sections

Fig. 1 shows the sites where the three test sections were constructed. Figs. 2–4 show, for each test section, pictures of the pavement condition before the bitumen stabilized layer construction and photos of the construction works and the pavement condition after such works. The bitumen stabilized materials were produced in a plant, and it is highlighted that they were applied as an overlay on the old asphalt pavement. Then, a new asphalt concrete layer was laid over them.

3. Laboratory and field testing

In the base courses of sections built in 2011 and 2015, Cold Bituminous Emulsion Mixes (CBEM) with emulsion content of 4.5 % (residual asphalt content of 3.0 %) were applied. A density of 1.810 kg/m^3 was obtained using Marshall methodology, which resulted in an air voids content of 26 %.

On the other hand, the mix used in the section built in 2019 was a Cement Emulsion Treated Mix (CETM), designed according to TG2 Methodology [33]. It was a combination of new aggregates (44 %), RAP (55 %), and Portland cement (1.0 %); besides, the emulsion content was 3.0 % (residual asphalt content of 2.0 %). Modified Proctor compaction tests were conducted to determine the optimum moisture content (4.8 %) and the maximum dry density, MDD (2.024 kg/m^3). The mixes grain size distributions are shown in Fig. 5. It is possible to note that the CETM has a denser grain size distribution than the CBEM.

3.1. Indirect tensile strength (ITS) test

This test follows the procedures described in Appendix B of the TG2 [33]. To determine the asphalt content to be added to the stabilized mixes, samples with different residual asphalt contents are molded. The asphalt content in these samples followed the values presented in the Guidelines for Estimating Nominal Bitumen, presented on TG2. The nominal asphalt content depends on the fraction passing 0.075 mm and 4.75 mm sieves. The asphalt content varied from minus 0.4 % to plus 0.2 %, considering the expected nominal asphalt content.

In this research, the fraction passing 0.075 mm sieve was 5.8 %, and for the 4.75 mm sieve it was 41.2 %. According to TG2, the nominal asphalt content was defined as 2.2 %, so the residual asphalt contents tested were 1.8 %, 2.0 %, 2.2 %, and 2.4 %.

Six cylindrical specimens (150 mm × 95 mm size) were prepared for each mix to determine the ITS in dry (ITS_{dry}) and wet (ITS_{wet}) conditions, both in triplicates. The specimens were molded using an IPC Global Servopac gyratory compactor, and the number of gyrations to achieve the MDD (2.024 kg/m^3) varied from 70 to 200. Once the specimens have been extracted from their respective molds, they are placed in an oven at 40 °C (±1 °C) for a minimum of 72 h. After the curing period, the samples are allowed to cool to a constant temperature of 25 °C (±2 °C). Carrying out the tests leads to ITS in dry condition.

For the wet condition, the samples must be placed in water in the

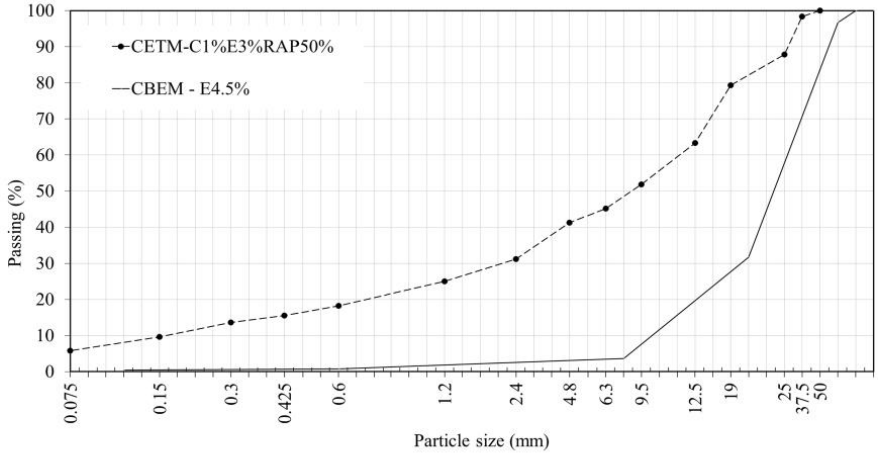


Fig. 5. CBEM and CETM grain size distributions.

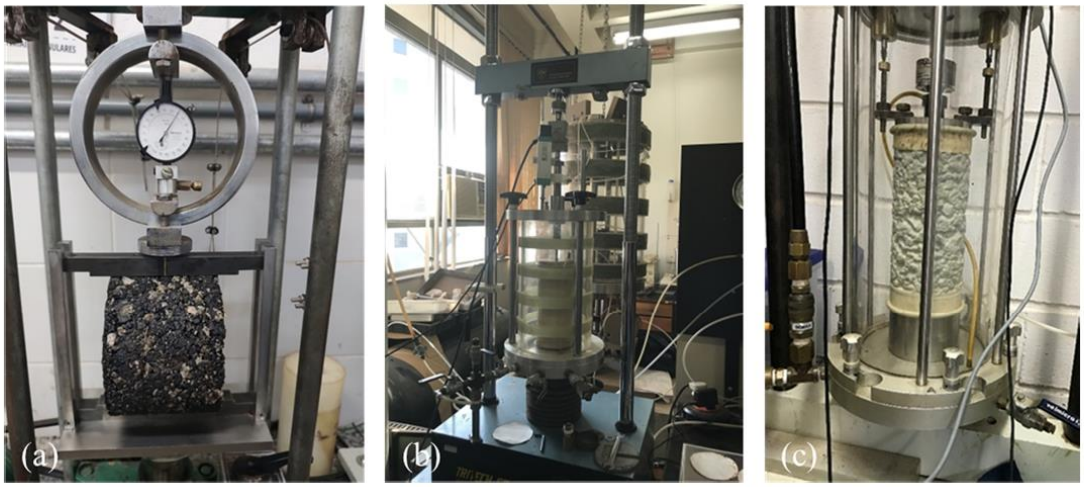


Fig. 6. Laboratory tests: (a) ITS; (b) monotonic triaxial; and (c) repeated load triaxial.

immersion bath for 24 h at 25 °C (±2 °C). After immersion, the samples are dried on the surface and tested immediately.

Fig. 6(a) shows the apparatus for carrying out the test. A load of 0.1 kN is applied to the sample to lay the loading strips, and then the sample is loaded at a constant rate of 50 ± 5 mm/min until maximum loading is reached.

3.2. Monotonic triaxial test

Three cylindrical specimens with dimensions of 100 mm × 180 mm were prepared for each mix. The tests were carried out using a Wykeham Farrance triaxial system, as shown in Fig. 6 (b). The samples were submitted to confining stresses of 25 kPa, 50 kPa, and 100 kPa. CBEM samples were prepared using a gyratory compactor (IPC Global Servopac), and the number of gyrations to achieve the density of 1.810 kg/m^3 varied between 150 and 490. The samples of CETM were compacted in five layers using a manual hammer (the same used for the compaction tests), and the number of blows to achieve the MDD of 2.024 kg/m^3 varied according to the layer and sample (weight and height were measured for each layer). Only optimum residual asphalt content samples were tested (3 % for CBEM and 2 % for CETM).

3.3. Repeated load triaxial test

Repeated load triaxial tests were carried out as per Brazilian standard DNIT 134/2010 – ME [34]. The samples were tested in a triaxial pneumatic testing machine (Fig. 6(c)). The applied loading frequency was 1 Hz, and 18 stress states were used. The confining stresses were 25 kPa, 50 kPa, 70 kPa, 105 kPa, and 140 kPa. For each confining pressure, three deviator stresses were applied (the ratios between confining pressure and deviator stress were 2, 3, and 4). Cylindrical specimens (100 mm × 180 mm) were prepared following the procedures described in Section 3.2. Once again, only optimum residual asphalt content samples were tested.

Table 1
ITS results for the CETM.

Residual asphalt (%)	ITS_{dry} (kPa)	ITS_{wet} (kPa)	ITS_{wet}/ITS_{dry} (%)
1.8	223	107	48
2.0	262	223	85
2.2	256	211	82
2.4	195	167	86

3.4. Falling weight deflectometer (FWD) test

FWD tests were carried out following Brazilian procedure DNER PRO-273/96 [35]. An Dynatest 8002 FWD equipped with seven geophones to measure the pavement elastic displacements was used. The distances from the loading plate to the geophones were 0, 200, 300, 450, 600, 900, and 1,200 mm. The load applied simulated an 8.2 tf standard axle load. Measured deflection values were normalized to 25 °C (D_{25}) using Model (1) [36].

$$D_{25} = \frac{D_p}{\left(\left(\frac{h_{CA}}{1000}\right)*(T-25)+1\right)} \quad (1)$$

where D_p (0.01 mm) is the deflection measured at the temperature T (°C), and h_{CA} is the asphalt layer thickness (cm).

3.5. Surface condition (Rutting measurements)

The rutting surveys were performed using a pavement scanner (Pavemetrics Laser Crack Measurement System – LCMS). This technology relates images obtained with high-resolution cameras and laser information to compose a 3D technology for detecting and classifying pavement defects that occur on the surface as well as the longitudinal and transversal profiles and slopes of the section. In the data processing, pavement surface evaluation can be carried out through continuous visual survey reports and pavement objective evaluation reports, such as those presented in the Brazilian procedure DNIT 006/2003–PRO [37].

3.6. Traffic volume

Data were collected in toll plazas near the test sections to determine the traffic volume. The annual average daily traffic (AADT) was obtained, and the vehicles were categorized into nine types of heavy trucks, considering the number and distribution of axles. A lane distribution factor of 0.5 was used, and the number of equivalent single axle loads (ESALs) was computed using the American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) load equivalency factors (considering that an 80.1 kN single axle is 1.00 ESAL). The number of ESALs was determined each year from construction to 2021.

4. Laboratory and field results

4.1. Indirect tensile strength test

It was not possible to carry out the tests for the CBEM mix due to the molding difficulties caused by the grain size distribution and lower cohesion of the mix. Table 1 and Fig. 7 show the values of ITS_{dry} and ITS_{wet} of CETM. It is shown that the best results of ITS are obtained with 2 % residual asphalt for both conditions (dry and wet). Between 1.9 % and 2.2 % of residual asphalt, the values suggested by TG2 (125 KPa for ITS_{wet} and 225 KPa for ITS_{dry}) were achieved. There is also a considerable increase in damage resistance against water immersion (ITS_{wet}/ITS_{dry}) when the residual asphalt is increased from 1.8 % to 2.0 % due to the hydrophobic characteristics of asphalt. Then the moisture resistance reaches an equilibrium, demonstrating excessive residual asphalt in the mixture. This corroborates with the choice of using 2 % as the optimum content.

4.2. Monotonic triaxial test results

Table 2 presents the effective shear strength parameters, cohesion (c), and internal friction angle (ϕ). Comparing the results of CBEM to those of CETM, it is verified that adding 1 % of cement and RAP to the mix increased the mix cohesion from 36 to 120 kPa, without any change in the internal friction angle (48°), even though the grain size distributions and the composition of the aggregates are different. The increase in cohesion due to an active filler addition was expected because of the hydraulic bonds it generates.

Table 2
CBEM and CETM shear strength parameters.

Mix	c (kPa)	ϕ (°)
CBEM	36	48
CETM	120	48

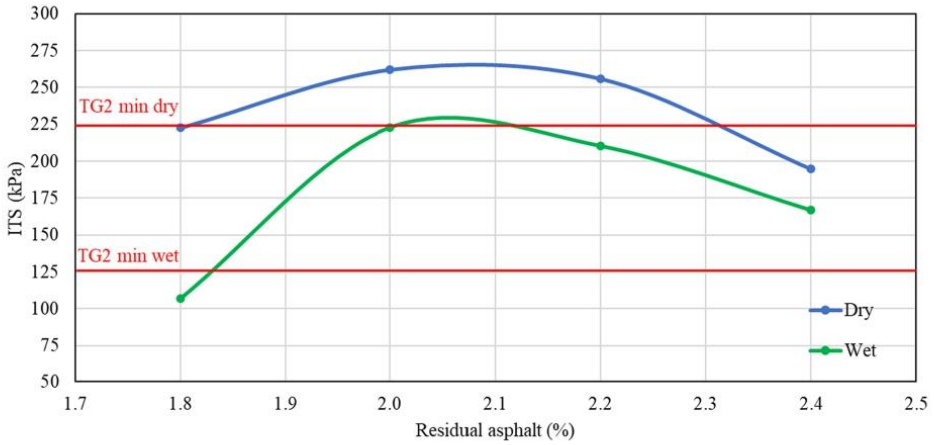


Fig. 7. ITS results compared to the TG2 limit range.

Table 3
CBEM and CETM resilient modulus values (in MPa).

σ_3	σ_d	CBEM-1	CBEM-2	CBEM-3	CBEM-4	CETM-1	CETM-2	CETM-3
0.020	0.020	308	478	494	540	540	376	278
0.020	0.040	307	446	498	507	446	371	272
0.020	0.060	311	435	436	500	440	371	259
0.035	0.035	351	511	553	552	572	414	302
0.035	0.070	353	484	530	539	524	416	313
0.035	0.105	365	471	527	538	550	414	324
0.050	0.050	392	533	591	603	647	466	365
0.050	0.100	419	522	557	583	630	473	394
0.050	0.150	426	501	548	567	641	484	427
0.070	0.070	438	580	602	631	733	527	452
0.070	0.140	456	551	589	609	709	532	486
0.070	0.210	486	544	582	599	724	551	518
0.105	0.105	533	635	678	697	859	636	624
0.105	0.210	565	616	649	672	856	646	645
0.105	0.315	581	622	671	687	852	659	655
0.140	0.140	405	682	761	751	975	784	738
0.140	0.280	381	680	715	745	954	774	743
0.140	0.420	–	–	723	739	937	775	732

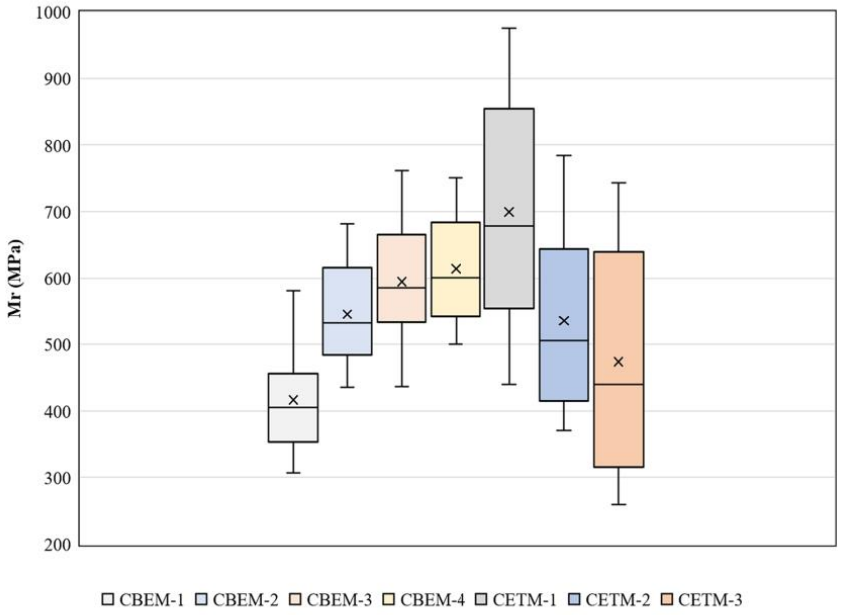


Fig. 8. Box and whisker plot of CBEM and CETM resilient modulus.

4.3. Repeated load triaxial test results

Table 3 presents the results of the repeated load triaxial test for each tested sample as a function of the confining pressure (σ_3) and deviator stress (σ_d). The resilient modulus (Mr) was computed relating the applied σ_d and the resulting recoverable vertical strain. The results are also presented in a box and whisker plot (Fig. 8) to indicate the dispersion. The modulus of the CBEM varied from 300 MPa to 800 MPa, whereas that of CETM varied between 100 MPa and 1000 MPa. CETM achieved higher modulus values, possibly due to the active filler (cement) presence.

Regression was used to obtain resilient modulus models, and the k-θ model developed by Hicks and Monismith was chosen [38]. The k-θ model relates the resilient modulus to the sum of principal stresses (octahedral stress, θ). Models (2) and (3) were obtained based on the results of all samples tested for CBEM and CETM. The models make clear the dependence of the resilient modulus on the stress state, which is more noticeable for the mixes with RAP and cement (CETM) than for those with emulsion only (CBEM) – exponent values of 0.45 and 0.19, respectively. This is unexpected since the CETM has an active filler in its composition. The presence of RAP might have affected the stress sensitivity of the CETM, although it had not affected the internal friction angle.

$$Mr_{CBEM}\,(MPa) = 737(\theta)^{0.19} R2 = 0.73 \quad (2)$$

$$Mr_{CETM}\,(MPa) = 839(\theta)^{0.45} R2 = 0.84 \quad (3)$$

where Θ is the octahedral stress (MPa).

Table 4
Evolution of the characteristic deflections (in 10^{-2} mm).

Test section	Location (km)	Lane/Direction	Mix	D_C 2011	D_C 2014	D_C 2018	D_C 2019	D_C 2020	D_C 2021
BR-392 (2011)	174.3–175.0	1/West	CBEM	38	–	24	21	27	30
BR-392 (2011)	174.3–175.0	2/East	CBEM	–	–	21	24	34	18
BR-116 (2015)	417.4–418.0	1/North	CBEM	–	37	13	–	9	9
BR-116 (2015)	417.4–418.0	2/South	CBEM	–	16	12	11	12	14
BR-116 (2019)	506.0–507.0	1/North	CETM	–	–	69	40	32	35
BR-116 (2019)	506.0–507.0	2/South	CETM	–	–	110	90	45	39

Table 5
Pavement layers' modulus (MPa) obtained for the 2011 test section (BR-392, km 174).

Layer	Thickness (mm)	South Lane (1) Year					North Lane (2) Year				
		2011	2018	2019	2020	2021	2011	2018	2019	2020	2021
New asphalt concrete	40	–	4757	5262	4405	4274	–	4292	3665	4505	4008
CBEM	100	–	770	1192	1087	975	–	738	618	648	724
Old asphalt concrete	120	1813	758	1404	1354	1331	–	667	1113	1345	1443
Gravel base	400	388	163	170	318	162	–	199	143	260	176
Subgrade	–	405	309	390	444	557	–	416	423	464	487

Table 6
Pavement layers' modulus (MPa) obtained for the 2015 test section (BR-116, km 417).

Layer	Thickness (mm)	South Lane (1) Year					North Lane (2) Year				
		2015	2018	2019	2020	2021	2015	2018	2019	2020	2021
New asphalt concrete	60	–	4233	7500	7000	8500	–	5000	–	7667	8667
CBEM	120	–	1250	1441	696	1100	–	644	–	817	990
Old asphalt concrete	300	6842	2395	5750	1659	4675	1762	990	–	1140	5914
Soil base	400	348	56	209	206	117	295	47	–	72	169
Subgrade	–	203	222	269	286	432	178	650	–	514	376

Table 7
Pavement layers' modulus (MPa) obtained for the 2019 test section (BR-116, km 506).

Layer	Thickness (mm)	South Lane (1) Year			North Lane (2) Year		
		2019	2020	2021	2019	2020	2021
New asphalt concrete	30	–	3121	4252	–	3000	4814
CETM	130	–	460	985	–	512	1262
Old asphalt concrete	300	703	403	1512	1518	604	2260
Soil base	400	80	111	90	70	99	124
Subgrade	–	169	245	254	189	251	239

4.4. Field monitoring data analysis

Table 4 shows the results of FWD characteristic deflection (D_C). The Characteristic deflection, computed using Procedure PRO 11 of the Brazilian National Department of Transport Infrastructure, is the mean plus the standard deviation of the measured deflection values. It is important to note the considerable reduction in the deflection values after constructing, which varied from 90 to 450 μm. Moreover, after that, the deflection values kept almost constant, showing slight variations over the years, demonstrating that the solution was efficient and improved the resilient behavior of the pavement.

Backanalysis was carried out to determine in situ modulus of each pavement layer (Tables 5–7) using the FWD deflection basins and the AEMC program (part of the novel Brazilian pavement design method package – MeDiNa). The backcalculated resilient modulus values for the bitumen stabilized layers ranged from 682 MPa to 1122 MPa, thus comparable with those obtained from the repeated load triaxial test and those presented by TG2 [33].

Although it is already presented in the tables, the backcalculated modulus of the bitumen stabilized layers is also shown in Fig. 9 to understand its evolution with time better. CBEM layers seem to keep stable modulus values over time, with a slight variation (except for the mix applied in the South Lane of the 2015 Test Section). On the other hand, the modulus of the CETM doubles within a year, which might be related to the cement reactions, since one of its functions is to provide initial strength to traffic. However, only two FWD surveys were carried out in the 2019 test section, and the layer modulus might achieve an equilibrium similar to that of CBEM layers.

Table 8 shows the results of rutting monitoring from 2018 to 2021. The surface condition analysis shows that test sections with bitumen stabilized base courses maintain a low level of rutting. The rutting values have only increased in the last measurement, demonstrating that the material performs well, even rutting being the main failure criterion of such materials. Besides, only one section showed rutting values higher than 10 mm, which is the TG2 failure criteria. However, it was observed in the test section built in 2011 and only in 7 % of its length.

4.5. Traffic volume (Number of ESALs)

Table 9 presents the AADT and the accumulated number of ESALs from the construction year to 2021.

5. Mechanistic-Empirical (M-E) analysis

For the layers underneath the bitumen stabilized materials applied as overlay, the backanalysed modulus values shown in Tables 5–7 were used (year of construction data). The stabilized base layers' modulus

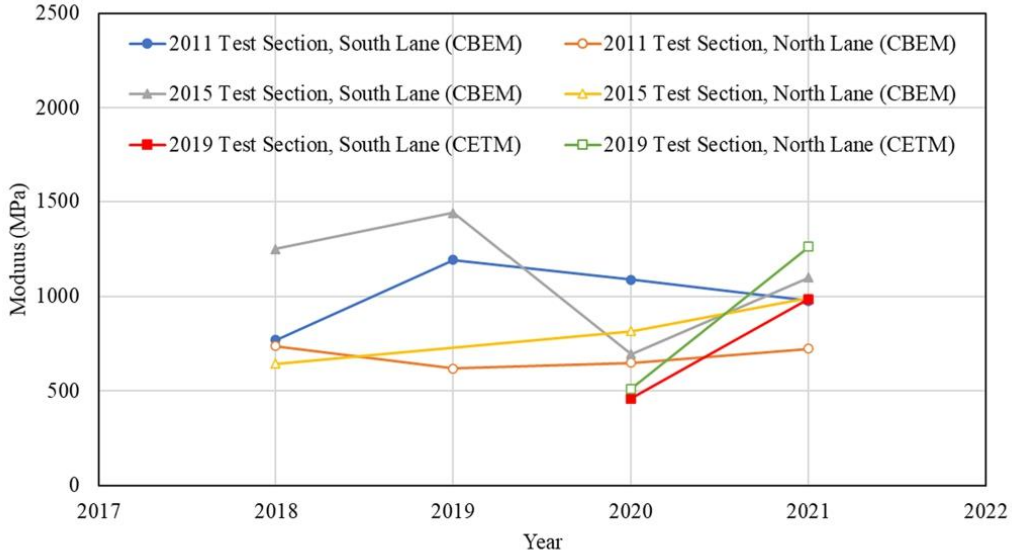


Fig. 9. Bitumen stabilized layers modulus evolution.

Table 8
Rutting monitoring results for the test sections.

Test section	Type of Mix	Rutting 2018		Rutting 2019		Rutting 2020		Rutting 2021	
		% > 10 mm	Average (mm)	% > 10 mm	Average (mm)	% > 10 mm	Average (mm)	% > 10 mm	Average (mm)
BR-392 (2011)	CBEM	0	4	0	4	0	4	7	7
BR-116 (2015)	CBEM	0	3	0	3	0	3	0	5
BR-116 (2019)	CETM	–	–	–	–	0	0.1	0	2

Table 9
Number of ESALs for the test sections.

Year	BR-392, km 111 + 465 (2011)		BR-116, km 430 + 790 (2015)		BR-116, km 510 (2019)	
	AADT	ESALs	AADT	ESALs	AADT	ESALs
2012	1392	9.40E + 05	–	–	–	–
2013	1941	2.31E + 06	–	–	–	–
2014	1979	3.71E + 06	–	–	–	–
2015	2178	5.29E + 06	–	–	–	–
2016	1981	6.72E + 06	2204	1.36E + 06	–	–
2017	2025	8.14E + 06	2166	2.69E + 06	–	–
2018	2160	9.71E + 06	2170	4.03E + 06	–	–
2019	2066	1.12E + 07	2158	5.35E + 06	–	–
2020	2040	1.27E + 07	2053	6.61E + 06	2153	1.31E + 06
2021	2212	1.44E + 07	2225	7.96E + 06	2300	2.71E + 06

values were computed using Models (2) and (3). HMA resilient modulus was set to 4,500 MPa. Table 10 shows the inputs used to carry out the M-E Analysis.

Using the M-E analysis results and the shear strength parameters presented in Table 3, it was possible to compute the test sections' performance by applying the TG2 model [33], presented in Model (4), which considers 10 mm as a limit for rutting. Besides, Model (5) is used to compute the Deviator Stress Ratio (DSR), which is an input for Model (4). Table 11 shows the results of performance prediction.

$$\log N = A - 57.286(DSR)^3 + 0.0009159(P_{MMD}.RetC) \quad (4)$$

$$DSR = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_{1,f} - \sigma_3} \quad (5)$$

where

- DSR is the ratio of the actual (applied) deviator stress to the maximum (failure) deviator stress, and expressed as a percentage;
- σ_1 and σ_3 are the major and minor principal stresses in the layer obtained using AEMC program;
- $\sigma_{1,f}$ is the major principle stress at failure from triaxial tests;
- A is a Reliability Coefficient linked to Road Category;
- RetC is the Retained Cohesion evaluated as the ratio of the soaked and unsoaked major principal stress at failure from triaxial testing at a confinement of 100 kPa;
- P_{MDD} is the dry density expressed as a percentage of MDD.

6. Field data versus predicted performance

Table 12 and Fig. 10 present the relationship between the measured rutting, the traffic data, and the consumption of the life predicted using the TG2 model (ESALs/TG2 ESALs). Using this data, it was possible to establish a model relating rutting to the accumulated number of ESALs.

Using Model (6) and knowing the accumulated number of ESALs for the design period, it is possible to predict the rut depth of the studied asphalt pavements, which were overlaid by bitumen stabilized layers and asphalt wearing courses. It is highlighted that the model is only valid for the ranges of rutting and ESALs reported here. Besides, CBEM

Table 10
Test sections M-E analysis inputs.

BR-392, km 174 (2011)			BR-116, km 417 (2015)			BR-116, km 506 (2019)		
Layer	Thickness (mm)	Modulus (MPa)	Layer	Thickness (mm)	Modulus (MPa)	Layer	Thickness (mm)	Modulus (MPa)
New asphalt concrete	40	4500	New asphalt concrete	60	4500	New asphalt concrete	30	4500
CBEM	100	Model (2)	CBEM	120	Model (2)	CETM	130	Model (3)
Old asphalt concrete	120	1813	Old asphalt concrete	300	1762	Old asphalt concrete	300	703
Gravel base	400	388	Soil base	400	295	Soil base	400	80
Subgrade	–	405	Subgrade	–	178	Subgrade	–	169

Table 11
Test sections predicted performance using the TG2 model.

Highway	Location (km)	σ_1 (kPa)	σ_3 (kPa)	$\sigma_{1,f}$ (kPa)	DSR	A	RetC (%)	P_{MDD} (%)	Predicted number of ESALs
BR-392 (2011)	174.3–175.0	480	183	1431	0.238	1.71113	75	100	6.43E + 07
BR-116 (2015)	417.4–418.0	174	42	980	0.283	1.71113	75	100	7.53E + 06
BR-116 (2019)	506.0–507.0	447	105	1338	0.277	1.71113	82	100	1.01E + 08

Table 12
Test sections observed and predicted performances.

Year	BR-392, km 174.3-175.0 (2011)			BR-116, km 417.4-418.0 (2015)			BR-116, km 506.0-507.0 (2019)		
	ESALs	ESALs/TG2 ESALs (%)	Rutting (mm)	ESALs	ESALs/TG2 ESALs (%)	Rutting (mm)	ESALs	ESALs/TG2 ESALs (%)	Rutting (mm)
2018	9.71E+06	15.1	4	4.03E+06	53.5	3	-	-	-
2019	1.12E+07	17.4	4	5.35E+06	71.1	3	-	-	-
2020	1.27E+07	19.8	4	6.61E+06	87.8	3	1.31E+06	1.3	0
2021	1.44E+07	22.3	7	7.96E+06	105.8	5	2.71E+06	2.7	2

ESALs/TG2 ESALs (%): consumption of the life predicted using the TG2 model.

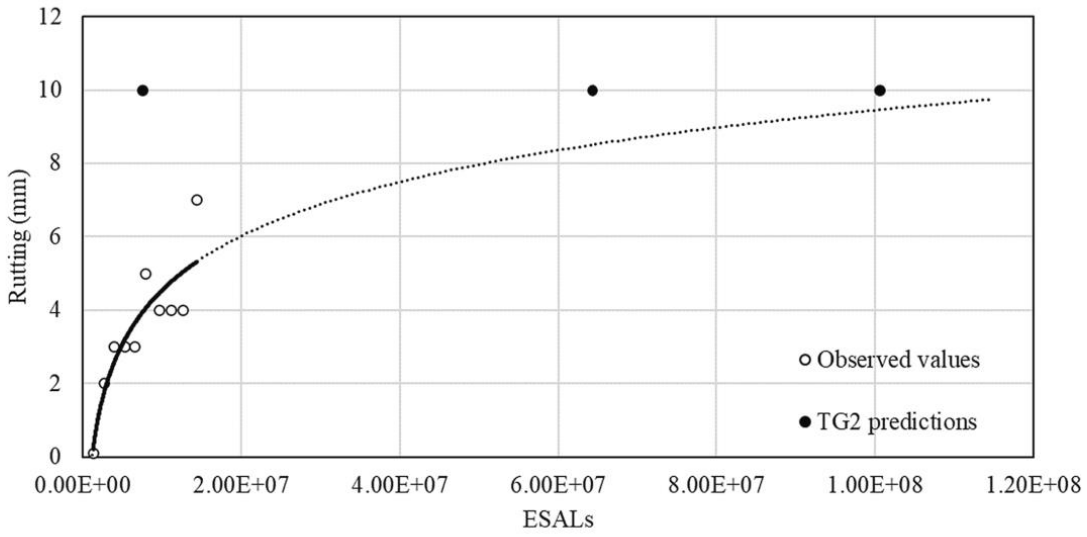


Fig. 10. Correlation between rutting and the number of ESALs.

and CETM results were used to obtain the model since both materials can be considered bitumen stabilized materials, even though the latter has an active filler on its composition.

$$\text{Rutting(mm)} = 2.1322*\ln(\text{ESALs}) - 29.828 \quad R^2 = 0.79 \tag{6}$$

Although the model is only valid for the investigated ranges of rutting and ESALs, when extrapolated, its results are close to those of the TG2 model for two test sections (BR-392 and BR-116 built in 2011 and 2019, respectively). It seems that rut depths obtained using the TG2 model do not match the field measured values when pavements are covered with a thick asphalt layer. In such cases, the number of ESALs to achieve the failure criteria (10 mm) seems to be underestimated. For

instance, the 2015 test section (BR-116, km 417.4–418.0), with a 60 mm asphalt wearing course, already exceeded the life predicted by the TG2 model, and, still, the rutting is lower than the TG2 failure criteria.

7. Conclusions

The following conclusions can be drawn based on the presented data and analysis:

- The addition of cement and RAP increased the cohesion of the mix (cement emulsion treated mix, CETM) compared to that stabilized with emulsion only (cold bituminous emulsion mix, CBEM).
- The indirect tensile strength test results showed that CETM has significant resistance to damage against water saturation.
- The resilient modulus of CETM and CBEM depends on the stress state. CETM was more sensitive even though it contains cement.
- The bitumen stabilized layers kept their structural capacity since neither excessive elastic deformation nor rutting was observed.
- The TG2 model seems to underestimate the life of pavements with thick asphalt wearing courses (>40 mm).
- A model correlating rutting with the accumulated number of equivalent single axle loads (ESALs) was obtained. It allows rutting estimation of old asphalt pavements overlaid by bitumen stabilized layers and asphalt wearing courses. The model might be interesting for pavement management, although it is only valid for the investigated ranges of ESALs and rutting.

All in all, the most significant contribution of the study is that it demonstrates that using CBEM and CETM as overlays on existing pavements is an efficient solution, especially when it is necessary to reduce the influence of the water level variation on pavement performance.

CRediT authorship contribution statement

Cláudio Renato Castro Dias: Conceptualization, Methodology, Formal analysis, Investigation, Visualization, Writing - original draft. **Washington Peres Núñez:** Conceptualization, Methodology, Supervision. **Lélio Antônio Teixeira Brito:** Conceptualization, Supervision. **Marlova Grazziotin Johnston:** Conceptualization, Investigation. **Jorge Augusto Pereira Ceratti:** Conceptualization. **Leonardo Lunkes Wagner:** Conceptualization, Investigation. **William Fedrigo:** Conceptualization, Methodology, Writing – review & editing, Supervision.

Declaration of Competing Interest

The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

Data availability

Data will be made available on request.

Acknowledgments

The authors would like to thank the EcoRodovias Group; the Brazilian government agency ANTT (National Land Transportation Agency) to carry out this research and the Brazilian National Council for Research and Technological Development (CNPq) for providing financial assistance.

References

[1] W. Lovering, H. Cedergren, Structural Section Drainage, Proceedings of the First International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements, Ann Arbor, University of Michigan, August, 773-784; 1962.
[2] J. Harvey, B. Tsai, F. Long, D. Hung, Asphalt-treated permeable base - laboratory testing, performance, and predictions, Transp. Res. Rec. 1629 (1998) 98–0643, https://doi.org/10.3141/1629-15.
[3] M. Moaveni, I. Abuawad, K. Hasiba, D. Zhang, E. Tutumluer, Characterization of Emulsion Bitumen Stabilized Aggregate Base. 2nd International Conference on Transportation Geotechnics, Sapporo, Japan (2012).
[4] S. Nazarian, Design and constructability of emulsion-stabilized bases for full-depth reclamation. TRB 2013 Annual Meeting - Paper revised from original submittal, 2012.
[5] M. Meocci, A. Grilli, T.F. La, M. Bocci, Evaluation of mechanical performance of cement–bitumen-treated materials through laboratory and in-situ testing, Road Mater. Pavement Des. 18 (2) (2017) 376–389, https://doi.org/10.1080/14680629.2016.1213506.
[6] B. Dolzycki, M. Jaczewski, C. Szydlowski, The long-term properties of mineral-cement-emulsion mixs, Constr. Build. Mater. 156 (2017) 799–808, https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.09.032.
[7] A. Graziani, C. Godenzoni, F. Cardone, E. Bocci, M. Bocci, An application of the Michaelis-Menten model to analyze the curing process of cold recycled bituminous mixs, Int. J. Pavement Res. Technol. 10 (1) (2017) 62–74, https://doi.org/10.1016/j.ijprt.2016.09.002.
[8] J. Xu, S. Huang, Y. Qin, F. Li, The impact of cement contents on the properties of asphalt emulsion stabilized cold recycling mixs, Int. J. Pavement Res. Technol. 4 (1) (2011) 48–55.
[9] P. Orosa, I. Pérez, A.R. Pasandín, Evaluation of the shear and permanent deformation properties of cold in-place recycled mixs with bitumen emulsion using triaxial tests. Construction and Building Materials, 328, 127054, 2022 10.1016/j.conbuildmat.2022.127054.
[10] P. Fu, D. Jones, J.T. Harvey, S.A. Bukhari, Laboratory test methods for foamed asphalt mix resilient modulus, Road Mater. Pavement Des. 10 (1) (2009) 187–212, https://doi.org/10.3166/RMPD.10.187-212.
[11] F.V. Guatimosim, K.L. Vasconcelos, L.L.B. Bernucci, K.J. Jenkins, Laboratory and field evaluation of cold recycling mix with foamed asphalt, Road Mater. Pavement Des. 19 (2) (2018) 385–399, https://doi.org/10.1080/14680629.2016.1261726.
[12] D. Dal Ben, K.J. Jenkins, Performance of cold recycling materials with foamed bitumen and increasing percentage of reclaimed asphalt pavement, Road Mater. Pavement Des. 15 (2) (2014) 348–371, https://doi.org/10.1080/14680629.2013.872051.
[13] M. Bocci, A. Grilli, F. Cadone, A. Graziani, A study on the mechanical behaviour of cement–bitumen treated materials, Constr. Build. Mater. 25 (2) (2011) 773–778, https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.07.007.
[14] A. Grilli, A. Graziani, M. Bocci, Compactability and thermal sensitivity of cement–bitumen-treated materials, Road Mater. Pavement Des. 13 (4) (2012) 599–617, https://doi.org/10.1080/14680629.2012.742624.
[15] M. Bocci, A. Grilli, F. Cardone, G. Ferrotti, Full-depth reclamation for rehabilitation of local roads: a case study, Int. J. Pavement Eng. 15 (3) (2012) 191–201, https://doi.org/10.1080/10298436.2012.657196.
[16] C. Godenzoni, A. Graziani, D. Perraton, Complex modulus characterisation of cold-recycled mixs with foamed bitumen and different contents of reclaimed asphalt, Road Mater. Pavement Des. 18 (1) (2017) 130–150, https://doi.org/10.1080/14680629.2016.1142467.
[17] C. Mignini, F. Cardone, A. Graziani, Complex modulus of cement-bitumen treated materials produced with different reclaimed asphalt gradations, Mater. Struct. 55 (2022) 169, https://doi.org/10.1617/s11527-022-02009-4.
[18] C. Ojum, N. Thom, (2017). Effect of binder in recycled asphalt on cold-mix pavements. Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Construction Materials, 170(4), 205–210. 10.1680/jcoma.16.00038.
[19] A.K. Kuchiishi, K. Vasconcelos, L.L.B. Bernucci, Effect of mix composition on the mechanical behaviour of cold recycled asphalt mixs, Int. J. Pavement Eng. 22 (8) (2019) 984–994, https://doi.org/10.1080/10298436.2019.1655564.
[20] J.P.C. Meneses, K. Vasconcelos, L.L.B. Bernucci, E. Hajj, Compaction methods of cold recycled asphalt mixs and their effects on pavement analysis, Road Mater. Pavement Des. 22 (sup1) (2021) S154–S179, https://doi.org/10.1080/14680629.2021.1908405.
[21] A.K. Kuchiishi, C.C.D.S. Antão, K. Vasconcelos, J. Pires, O.M.D.O. Araújo, L.L. B. Bernucci, R.T. Lopes, Investigation of the matric suction role on the curing mechanism of foamed asphalt stabilised mixs, Road Mater. Pavement Des. 20 (sup1) (2019) S365–S389, https://doi.org/10.1080/14680629.2019.1589558.
[22] F. Cardone, A. Virgili, A. Graziani, Evaluation of bonding between reclaimed asphalt aggregate and bitumen emulsion composites, Constr. Build. Mater. 184 (2018) 565–574, https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.07.016.
[23] G. Tebaldi, E.V. Dave, P. Marsac, P. Muraya, M. Hugener, M. Pasetto, A. Graziani, A. Grilli, M. Bocci, A. Marradi, L. Wendling, V. Gaudefroy, K. Jenkins, A. Loizos, F. Canestrari, Synthesis of standards and procedures for specimen preparation and in-field evaluation of cold-recycled asphalt mixes, Road Mater. Pavement Des. 15 (2) (2014) 272–299, https://doi.org/10.1080/14680629.2013.866707.
[24] P.G. Mondal, K.K. Kuna, Mix design considerations for foamed bitumen stabilized materials: a review, Constr. Build. Mater. 326 (2022), 126783, https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126783.
[25] F. Xiao, S. Yao, J. Wang, X. Li, S. Amirkhanian, A literature review on cold recycling technology of asphalt pavement, Constr. Build. Mater. 180 (2018) 579–604, https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.06.006.

[26] T. Weir, G. White, R. Espinosa, Review of the design, characterisation and production of foamed bitumen stabilised base courses for pavement construction, Aust. J. Civ. Eng. 20 (2) (2022) 308–325, https://doi.org/10.1080/14488353.2021.1974658.
[27] B. Dołżycki, P. Jaskuła, Review and evaluation of cold recycling with bitumen emulsion and cement for rehabilitation of old pavements, J. Traffic Transp. Eng. (Engl. Ed.) 6 (4) (2019) 11–323, https://doi.org/10.1016/j.jtte.2019.02.002.
[28] W. Fedrigo, W.P. Núñez, A.T. Visser, A review of full-depth reclamation of pavements with Portland cement: Brazil and abroad, Constr. Build. Mater. 262 (2020), 120540, https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120540.
[29] M. Bocci, F. Canestrari, A. Grilli, E. Pasquini, D. Lioi, Recycling techniques and environmental issues relating to the widening of a high traffic volume Italian motorway, Int. J. Pavement Res. Technol. 3 (4) (2010) 171–177.
[30] J.J.E. Liebenberg, A.T. Visser, Stabilization and structural design of marginal materials for use in low-volume roads, Transp. Res. Rec. 1819 (2003) 166–172.
[31] J.J.E. Liebenberg, A.T. Visser, Stabilization and structural design of marginal materials for use in low-volume roads, J. South Afr. Inst. Civil Eng. 46 (3) (2004) 2–8, https://doi.org/10.3141/1819b-21.
[32] P. Fu, B.D. Steven, D. Jones, J.T. Harvey, Relating Laboratory Foamed Asphalt Mix Resilient Modulus Tests to Field Measurements, Road Mater. Pavement Des. 10 (1) (2009) 155–185, https://doi.org/10.1080/14680629.2009.9690186.
[33] Asphalt Academy. TG 2 Third Edition, Technical Guideline: Bitumen Stabilised Materials. A Guideline for the Design and Construction of Bitumen Emulsion and Foamed Bitumen Stabilised Materials. Pretoria, South Africa. 2020.
[34] Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Pavimentação – Solos – Determinação do módulo de resiliência – Método de ensaio: DNIT 134/2010 – ME. Rio de Janeiro, 11 p. 2010b.
[35] Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Determinação de deflexões utilizando deflectômetro de impacto tipo "Falling Weight Deflectometer (FWD)": DNER-PRO 273/96. Rio de Janeiro, 4 p. 1996.
[36] Departamento de Estradas e Rodagem do Estado de São Paulo. IP-DEP00/003 – avaliação funcional e estrutural de pavimento. São Paulo, 2006.
[37] Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Avaliação objetiva da superfície de pavimentos flexíveis e semi-rígidos – Procedimento: DNIT 006/2003 – PRO. Rio de Janeiro, 2003.
[38] R.G. Hicks, C.L. Monismith, Factors influencing the resilient properties of granular materials, Highw. Res. Rec. 345 (1971) 15–31.

ANEXO IV

(Artigo: “Reciclagem de pavimentos com emulsão asfáltica: efeito da granulometria e da compactação no comportamento resiliente” 25º ENACOR – Encontro Nacional de Conservação Rodoviária e 48ª RAPv – Reunião Anual de Pavimentação, juntamente com a 4ª ExpoEnacor)



19 a 22 de Setembro de 2023
Foz do Iguaçu - PR
www.rapvenacor.com.br

ABDER

DER PARANÁ

ABPv

25º Encontro Nacional de Conservação Rodoviária (ENACOR)
48ª Reunião Anual de Pavimentação (RAPv)

Reciclagem de pavimentos com emulsão asfáltica: efeito da granulometria e da compactação no comportamento resiliente

DOI: *(a ser preenchido após o envio do código DOI da publicação)*

Katlin Modesto Dorneles[1]; Lucas Czamanski Meireles[1]; Leonardo Lunkes Wagner[1]; Thaís Radünz Kleinert[1]; Lelio Antônio Teixeira Brito[1]; Washington Peres Núñez[1] & Claudio Renato Castro Dias[2]

RESUMO
A reciclagem asfáltica reutiliza materiais do pavimento para construir novas camadas. Uma técnica é usar o fresado, também conhecido como *Reclaimed Asphalt Pavement* (RAP), obtido ao remover a camada asfáltica deteriorada e incorporá-lo como agregado nas camadas de base ou sub-base. Tal processo tem crescido no Brasil devido a vantagens técnicas, econômicas e ambientais. No entanto, algumas dúvidas persistem, como a consideração da granulometria do fresado e o método de compactação em laboratório. Dessa forma, o objetivo do trabalho consiste em avaliar o efeito da granulometria e do tipo de compactação no comportamento resiliente de misturas recicladas com emulsão asfáltica. Foram estudadas duas misturas de fresado, agregados virgens e emulsão, considerando nas curvas granulométricas o agregado do fresado após a extração do ligante e sem a extração (*black rock*), ambas dentro da faixa granulométrica adequada. As misturas foram compactadas usando energia Proctor Modificada, com dois métodos: vibratório e dinâmico (soquete). Após a compactação, foram realizados ensaios triaxiais para determinação do módulo de resiliência, conforme o Método de Ensaio 134 (DNIT, 2018). Os resultados mostraram que a compactação dinâmica foi mais eficiente do que a vibratória, alcançando maior grau de compactação e, consequentemente, valores mais altos de módulo de resiliência. Também se verificou que há efeito na forma de consideração da granulometria do RAP, de modo que as amostras considerando o RAP sem extração do ligante asfáltico, ou seja, *black rock*, apresentaram melhores resultados, comportamento que pode estar relacionado à densificação da mistura.
PALAVRAS-CHAVE: Reciclagem de pavimentos; BSM; Modulo de resiliência; Compactação; Granulometria

ABSTRACT
Asphalt recycling reuses pavement materials to construct new layers. One technique involves using milled asphalt, also known as Reclaimed Asphalt Pavement (RAP), obtained by removing the deteriorated asphalt layer and incorporating it as an aggregate in the base or sub-base layers. This process has been growing in Brazil due to its technical, economic, and environmental advantages. However, some doubts persist, such as considering the gradation of the RAP and the laboratory compaction method. In this way, the objective of this study is to evaluate the effect of gradation and compaction type on the resilient behavior of recycled mixtures with asphalt emulsion. Two mixtures of RAP, virgin aggregates, and emulsion were studied, considering the difference in gradation of the RAP, all within the appropriate gradation range. The mixtures were compacted using Modified Proctor energy, with two methods: vibratory and dynamic (rammer). After compaction, triaxial resilience modulus tests were conducted following Test Method 134 (DNIT, 2018). The results showed that dynamic compaction was more efficient than vibratory compaction, achieving a higher degree of compaction and consequently higher values of resilience modulus. It was also observed that the consideration of RAP gradation had an effect, with samples considering RAP without asphalt binder extraction (*black rock)* showing better results, which may be related to the mixture density.
KEY WORDS: Pavement recycling; BSM; Resilience modulus; Compaction; Gradation.

[1] Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, e-mail: katlinmodestodorneles@gmail.com; czamanskimeireles@hotmail.com.br; leonardo.lunkes@ufrgs.br; thais.kleinert@ufrgs.br; lelio.brito@ufrgs.br; washington.nunez@ufrgs.br;
[2] Grupo Ecorodovias, e-mail: claudio.dias@ecorodovias.com.br

durante o processo de cura, o cimento Portland reage com a água presente tanto na emulsão quanto adicionado à mistura, colaborando para a quebra da emulsão. Com baixa dosagem de cimento, os produtos de hidratação se dispersam no interior dos filmes de emulsão frescos, aumentando a viscosidade da mistura e melhorando a resistência à deformação permanente (GRAZIANI et al., 2016). A quantidade de cimento deve ser limitada para evitar a diminuição da flexibilidade das misturas (YAN et al., 2017). Materiais estabilizados com emulsão são materiais ligados de forma não contínua, de modo que o comportamento do BSM é semelhante ao de materiais granulares não ligados, contudo apresentam uma coesão melhorada e uma reduzida sensibilidade à umidade (WIRTGEN GROUP, 2012).

A Figura 1 apresenta o comportamento dos materiais estabilizados com emulsão, frente aos demais materiais utilizados na pavimentação. Observa-se que ele apresenta um comportamento intermediário, mesmo contendo cimento e emulsão.

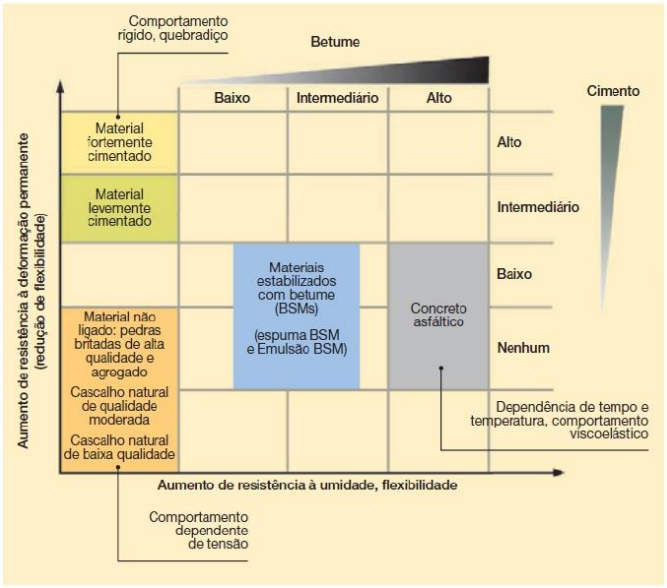


Figura 1: Posicionamento do BSM frente aos demais materiais de pavimentação (WIRTGEN GROUP, 2012)

O sucesso na utilização deste material depende do estudo e seleção de cada componente que será utilizado - o agregado virgem, material fresado, emulsão e fíler. Existem diferentes tipos de emulsões disponíveis, tais como as de ruptura rápida, média ou lenta, e a escolha adequada depende de fatores como as condições climáticas, o tipo de agregado utilizado e a condição do pavimento em questão. Ao optar pela emulsão asfáltica apropriada, é possível estabelecer uma sólida ligação entre os materiais reciclados e a nova camada de revestimento, resultando em um pavimento de alta resistência e durabilidade.

A utilização de materiais estabilizados com emulsão está estreitamente associada à reciclagem de pavimentos. Ou seja, consegue-se obter um material com características interessantes no ponto de vista de comportamento de materiais de pavimentação e reintroduzir o RAP em misturas, sem a

INTRODUÇÃO

A crescente conscientização ambiental e a busca por redução de custos em projetos têm impulsionado pesquisas e o desenvolvimento de novos materiais no contexto do reaproveitamento de materiais. A reciclagem de pavimento não é uma técnica nova. No entanto, técnicas de recuperação estrutural, considerando a reincorporação do fresado asfáltico (RAP - *reclaimed asphalt pavement*), a adição de agregados virgens e a estabilização com emulsão, ainda carece de estudos e compreensão.

A reciclagem de pavimentos é uma técnica de reabilitação de rodovias que visa reutilizar materiais envelhecidos, incorporando-os em novas misturas, com ou sem o uso de agentes rejuvenescedores, agregados para correção granulométrica e aditivos como cimento, cal ou outros produtos químicos (BERNUCCI et al., 2022; FEDRIGO, 2015). A utilização desses materiais tem sido cada vez mais demandada devido à sua versatilidade em termos de características mecânicas. No entanto, existe uma escassez de normas e análises que investiguem o comportamento do material, especialmente em relação aos diferentes tipos de granulometria e o comportamento resiliente do material.

Manuais para obtenção de parâmetros e dosagem como TG2 (SABITA, 2020), Reciclagem à Frio (WIRTGEN GROUP, 2012), dosagem FDR - *Full Depth Reclamation* (ARRA, 2018), já trazem diversos conceitos para a utilização de materiais estabilizados com emulsão. Entretanto, deve haver uma maior compreensão do comportamento resiliente desses materiais, uma vez que o módulo de resiliência (MR) é um dos parâmetros para dimensionamento pelo Método de Dimensionamento Nacional (MeDiNa) e não é considerado em nenhum dos manuais anteriormente citados.

Desta forma, o presente trabalho buscou avaliar o comportamento resiliente de materiais reciclados, oriundos de misturas RAP mais agregados virgens, estabilizados com emulsão asfáltica, com duas considerações de granulometria e dois métodos de compactação.

MATERIAIS ESTABILIZADOS COM EMULSÃO

Os materiais estabilizados com emulsão fazem parte dos *Bitumen Stabilization Materials* (BSM), ou seja, materiais estabilizados com emulsão. Os BSM são amplamente utilizados em projetos de reabilitação de pavimentos, especialmente quando o desgaste na estrutura do pavimento existente está limitado às camadas superiores (SABITA, 2020; WIRTGEN GROUP, 2012). Assim, a maioria dos projetos de BSM realizados nas últimas duas décadas têm se concentrado na reabilitação e modernização de pavimentos, envolvendo a reciclagem do material *in situ* para reforço e/ou alargamento.

Atualmente, a reciclagem à frio em profundidade total de pavimentos asfálticos antigos usando cimento e emulsão asfáltica é uma das tecnologias de reciclagem mais populares, pois é bastante rápida e relativamente barata, com uso fortemente reduzido de novos materiais (DOLZYCKI; JACZEWSKI; SZYDLOWSKI, 2017). Observa-se que, embora seja uma mistura estabilizada, ainda são identificadas características remanescentes do material granular original, pois a emulsão envolve predominantemente as partículas finas, enquanto as partículas maiores não são revestidas completamente, resultando em uma mistura com emulsão não contínua. Consequentemente, a estabilização com emulsão melhora a sensibilidade à umidade do material original e, diferentemente de outras técnicas de estabilização, não é propensa a apresentar falhas de trincamento por fadiga.

A inclusão de um fíler ativo, como cal ou cimento Portland, é frequentemente empregada nas misturas estabilizadas com emulsão. Quando o fíler selecionado é o cimento Portland, este material é limitado em 1%, pois quando adicionado em quantidades maiores, o material se torna frágil, perdendo a propriedade flexível (SABITA, 2020). Ainda assim, é importante a adição do fíler, uma vez que

necessidade de uma mistura a quente. O RAP é obtido por meio da fresagem a frio ou quente da remoção da camada asfáltica desgastada, de forma parcial ou totalmente (NIVEDYA; RAVINDRAN; MURALI KRISHNAN, 2016). Quando o material fresado é misturado com espuma asfáltica ou emulsão e materiais pétreos, o material obtido é conhecido como BSM (SABITA, 2020). No entanto, ainda existem lacunas na consideração da granulometria ao utilizar o RAP. Algumas agências levam em conta a contribuição do ligante envelhecido presente no RAP, mas a maioria delas trata o RAP de forma semelhante a um agregado natural ou pedra britada, ou seja, o ligante presente no material RAP é considerado inerte devido às baixas temperaturas de produção (MONDAL; KUNA, 2022).

MATERIAIS E MÉTODOS

Para a avaliação do comportamento resiliente dos materiais BSM, realizou-se a compactação de dois corpos de prova (CP's) para duas granulometrias distintas e duas formas de compactação, totalizando 8 corpos de prova. A Figura 2 apresenta as formas de compactação empregadas neste trabalho, sendo que foram utilizados o martelo vibratório de 23 J, como especificado no TG2 (SABITA, 2020), e o soquete Proctor de 4,54 kg.



a) Martelo vibratório b) Soquete manual

Figura 2: Equipamentos utilizados para compactação das amostras

O primeiro conjunto de corpos de prova utilizou uma dosagem composta por RAP, brita 1 ½", brita ¾" e cimento. Essa configuração será denominada Projeto 1. Salienta-se que a granulometria do RAP foi considerada após a extração do ligante e que a taxa de cimento foi limitada a 1%. A densidade obtida no ensaio de compactação, na energia Proctor modificada, foi de 1,850 g/cm³ e um teor de umidade de 4,8%. Para esse projeto, realizou-se a compactação com martelo vibratório de 23 J.
Para o Projeto 2, foram utilizadas as mesmas composições do Projeto 1, contudo, os corpos de prova foram compactados manualmente com soquete, conforme o método de ensaio 134 (DNIT, 2018). A

Figura 3 apresenta fotos da mistura correspondente aos Projetos 1 e 2; de um CP antes da realização do ensaio triaxial, corresponde ao Projeto 1; e o ensaio de MR triaxial ocorrendo.



a) Mistura Projeto 1 e 2 b) CP Projeto 1 c) MR Projeto 1

Figura 3: Misturas Projetos 1 e 2; CP Projeto 1; ensaio em andamento

O Projeto 3 considerou uma dosagem composta por RAP, brita 1 ½", pó de pedra e cimento. Diferentemente do Projeto 1, o Projeto 3 considerou o RAP como sendo um *black rock*, ou seja, granulometria sem a extração do ligante asfáltico, e a taxa de cimento também foi limitada a 1%. A densidade obtida no ensaio de compactação na energia Proctor modificada, foi de 2,069 g/cm³ e o teor de umidade ótimo de 7,9%. A compactação dos corpos de prova foi realizada com martelo vibratório de 23 J. Para o Projeto 4, utilizou-se a mesma composição do Projeto 3, contudo, os corpos de prova foram compactados manualmente com o soquete.

A Figura 4 apresenta as imagens da mistura dos Projetos 3 e 4; bem como um corpo de prova antes do ensaio, correspondente a um CP do Projeto 3; e a execução dos ensaios de MR triaxial.

Para todos os casos, definiu-se o teor de 2% de emulsão residual do tipo RM-2C, que é uma emulsão de ruptura média. Para melhor compreensão dos dados, a Tabela 1 resume os métodos de compactação e granulometria do RAP utilizados em cada projeto, de modo a informar a codificação adotada neste trabalho para melhor identificação.

Para análise do módulo de resiliência triaxial, foi necessária a compactação de corpos de prova com 15 cm de diâmetro e 30 cm de altura, sendo cada corpo de prova compactado em 10 camadas, conforme determina o método de ensaio 134 (DNIT, 2018). Devido ao material analisado, ser estabilizado com emulsão, realizou-se um procedimento de cura, de modo a proporcionar o correto rompimento da emulsão, adaptando o preconizado pelo TG2 (SABITA, 2020), indicado para compactação de corpos de prova para ensaios triaxiais monotônicos. Após a compactação, os corpos de prova permaneceram dentro dos moldes durante a noite, cobertos com um pano úmido; sendo que na manhã seguinte, eles foram removidos dos seus respectivos moldes e identificados.



a) Mistura Projeto 3 e 4 b) CP Projeto 3 c) MR Projeto 3

Figura 4: Mistura Projetos 3 e 4; CP Projeto 3; ensaio em andamento

Tabela 1: Codificação adotada para cada projeto

Projeto	Granulometria do RAP	Tipo de compactação	Codificação adotada
1	com extração	vibratória	c_ext_vib
2	com extração	dinâmica	c_ext_din
3	sem extração	vibratória	s_ext_vib
4	sem extração	dinâmica	s_ext_din

Os CP's foram então colocados em estufa a 40 ° C (± 1 ° C) por 8 horas. Finalizado o período, eles foram removidos da estufa, envolvidos por um saco plástico e selados; e novamente colocados na estufa. Após 48 horas eles foram removidos da estufa, sendo realizada a troca do saco por um seco, e permaneceram esfriando a 25 ° C (± 2 ° C) por um período mínimo de resfriamento de 12 horas. Destaca-se que as amostras só foram removidas de seus sacos plásticos e pesadas imediatamente antes do ensaio.

Assim, realizou-se o ensaio de módulo de resiliência triaxial conforme o método de ensaio 134 (DNIT, 2018), com 1500 ciclos de condicionamento e os demais ciclos com os 18 pares de tensões estabelecidos na norma.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Como resultado de cada ensaio triaxial de cargas repetidas têm-se 18 valores de módulo de resiliência, associados aos pares de tensões aplicados (tensão confinante e desvio). Ao ensaiar dois corpos de

prova por projeto, têm-se 36 valores de MR. Dessa forma, se considerou mais representativo trabalhar com modelos que incluíssem todos os resultados de MR para cada projeto.
Ao se aplicarem os dados nos diferentes modelos (em função das tensões confinante, desvio e octaédtrica), observou-se que o modelo composto (Equação 1) foi o mais significativo estatisticamente. Isso significa que o módulo de resiliência das misturas ensaiadas é influenciado pelas tensões confinante e desvio simultaneamente.

$$MR = k_1 \times \sigma_3^{k_2} \times \sigma_d^{k_3} \quad (1)$$

Onde:

MR – módulo de resiliência, em MPa;

σ_3 – tensão confinante, em MPa;

σ_d – tensão desvio, em MPa.

Uma vez que a representação gráfica é dificultada em decorrência da necessidade de utilizar gráficos em três dimensões, optou-se por apresentá-los no formato de caixa estreita, mais conhecido como *boxplot*. Os resultados obtidos para as quatro misturas ensaiadas são apresentados na Figura 5.

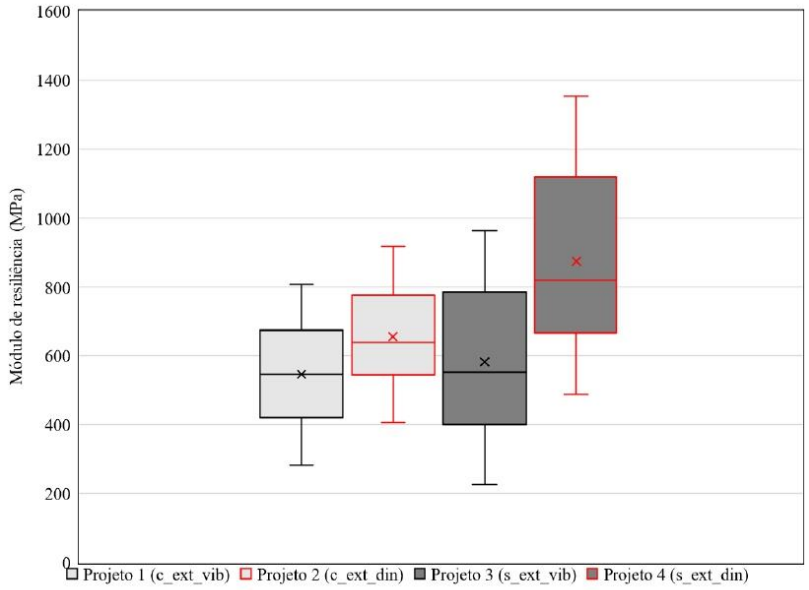


Figura 5: Variação dos módulos de resiliência obtidos para os pares de tensão dos ensaios triaxiais de cargas repetidas considerando as amostras dos projetos estudados

Os valores mínimo e máximo de cada resultado representam os limites inferiores e superiores, respectivamente, desconsiderando quaisquer valores atípicos (*outliers*). Entre esses limites e os extremos da caixa estão localizados 25% dos dados obtidos, correspondendo a 50% dos valores que se encontram fora da caixa. O limite inferior é conhecido como primeiro quartil, enquanto o limite superior é denominado terceiro quartil. Os outros 50% dos valores obtidos estão dentro da caixa, sendo a mediana (ou segundo quartil) representada por uma linha horizontal e a média pelo marcador. A Figura 5 traz várias informações acerca dos resultados obtidos, pois além de entender como se dá a variabilidade dos valores de MR para cada projeto, se consegue comparar os resultados obtidos. A primeira consideração a ser feita é que é possível identificar um incremento nos valores de MR quando se realiza a compactação com o uso de soquete (dinâmica) em relação à compactação vibratória. Tal comportamento pode ter ocorrido em função do grau de compactação (GC) alcançado, uma vez que as amostras compactadas de forma dinâmica alcançaram GC superior a 100% e aquelas compactadas por vibração apresentaram GC próximos a 96%. Ou seja, acredita-se que a diferença nos resultados está mais relacionada com a densificação do que com o método de compactação propriamente dito.

Outro aspecto que pode ser observado no gráfico da Figura 5 é que as amostras consideradas como *black rock*, ou seja, granulometria sem extração do ligante também apresentaram melhores resultados do que aquelas consideradas após a extração do ligante. Neste caso, é importante ressaltar que há uma diferença expressiva nos teores de umidade ótimo, bem como na densidade de projeto. As amostras denominadas aqui por *black rock* (Projetos 3 e 4) foram moldadas com 7,9% de umidade, enquanto as demais (Projetos 1 e 2) com 4,8%. Essa diferença pode ter ocasionado uma redução na lubrificação e consequentemente maior atrito entre as partículas e dificuldade na compactação. Com relação à densidade, as amostras dos Projetos 3 e 4 (2,069 g/cm³) apresentaram maiores valores em comparação às amostras dos Projetos 1 e 2 (1,850 g/cm³), devido a essa se tratar de uma graduação mais aberta, por não levar pó de pedra em sua composição. Pontos esses que influenciaram nos resultados, demonstrando que o Projeto 4 apresenta o melhor comportamento resiliente dentre os estudados. De forma geral, o Projeto 4 apresentou os maiores valores de MR.

Os parâmetros do modelo composto dos projetos estudados, assim como os parâmetros de confiabilidade são apresentados na Tabela 2. Lembra-se que a forma geral do modelo composto foi apresentada na Equação 1.

Tabela 2: Parâmetros do modelo composto de MR e de confiabilidade dos projetos estudados

Projeto	Características	k_1	k_2	k_3	R^2
1	c_ext_vib	1791	0,40	0,03	0,95
2	c_ext_din	1750	0,34	0,02	0,92
3	s_ext_vib	2726	0,47	0,13	0,98
4	s_ext_din	1793	0,32	0,02	1,00

O parâmetro k_2 explicita a dependência do MR frente à tensão confinante, sendo que todas as amostras apresentaram valores positivos de k_2, evidenciando que o MR aumenta com o confinamento da mistura, como pode ser observado na Figura 6. Destaca-se que esse confinamento é devido ao acréscimo de tensões horizontais geradas pelo tráfego e, em muito menor grau, pelas tensões geostáticas, já que geralmente são muito baixas, pois as camadas de pavimentos não são espessas o suficiente para proporcionar um confinamento considerável.

O parâmetro k_3 está relacionado à tensão desvio, de modo que, como esperado, à medida que essa tensão aumenta, há aumento nos valores de MR das misturas. Porém, o efeito da tensão desvio é significativamente menor do que da tensão confinante, por isso optou-se por não representá-los graficamente. Ainda, na tabela 2 são apresentados os coeficientes de determinação (R^2), sendo que o R^2 é elevado para todos os projetos estudados, demonstrando a significância dos modelos.

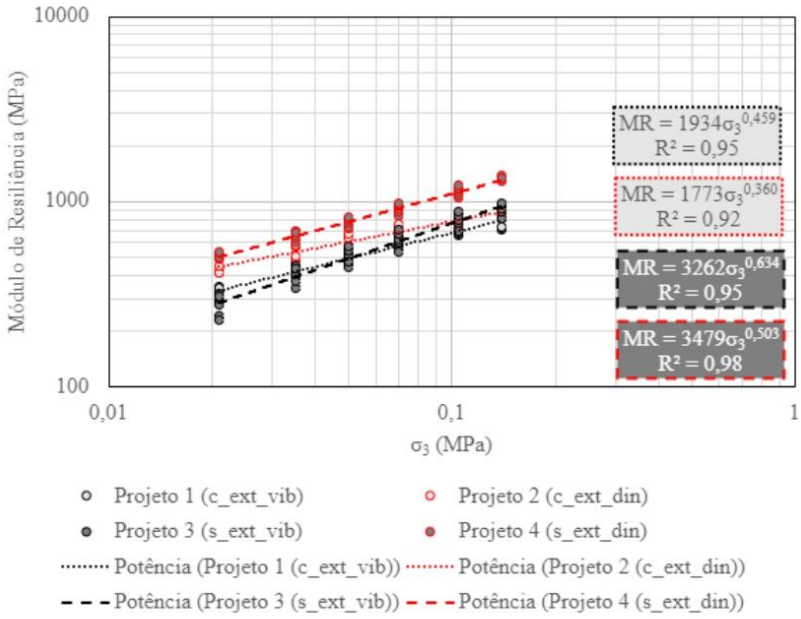


Figura 6: Representação gráfica e equações do modelo módulo de resiliência x tensão confinante

CONCLUSÃO

Neste trabalho foi estudado o comportamento resiliente de 4 misturas de RAP, agregados virgens e emulsão asfáltica. Para verificar o efeito de como se considerar a granulometria do RAP, foram realizadas dosagens variando-se a forma de consideração, com ou sem a extração do ligante asfáltico. Além disso, foram estudados dois métodos de compactação das amostras, dinâmico (soquete) e vibratório. Isso resultou em 4 Projetos: Projeto 1 (com extração e compactação vibratória); Projeto 2 (com extração e compactação dinâmica); Projeto 3 (sem extração e compactação vibratória) e Projeto 4 (sem extração e compactação dinâmica).

Com base nos modelos verificados, observou-se que o modelo composto foi o mais significativo estatisticamente para representar o comportamento do módulo de resiliência das misturas ensaiadas, embora o modelo dependente da tensão confinante também tenha apresentado significância elevada. Isso indica que o módulo de resiliência desses materiais é influenciado pelas tensões confinante e desvio simultaneamente. Os parâmetros do modelo composto dos projetos estudados, como k_2 e k_3, mostram a dependência do módulo de resiliência em relação à tensão confinante e desvio,

respectivamente. Todos os projetos apresentaram valores positivos de k_2 e k_3, indicando que o MR aumenta com as variações de tensões da mistura.
Em relação aos valores de MR obtidos, observou-se que a compactação dinâmica resultou em um melhor comportamento resiliente das misturas, em comparação com a vibratória. Tal resultado pode estar relacionado ao maior grau de compactação alcançado com a compactação dinâmica. As amostras consideradas como *black rock*, ou seja, com granulometria sem a extração do ligante, apresentaram melhores resultados de MR do que aquelas consideradas após a extração do ligante. Essa diferença pode ser atribuída a variações nos teores de umidade ótimo e na densidade de projeto. Desta forma, o Projeto 4 foi o que apresentou o melhor comportamento resiliente entre os estudados, com os maiores valores de MR.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com o apoio dos Recursos para Desenvolvimento Tecnológico - RDT, da Concessionária de Rodovias CCR ViaSul, sob regulação da Agência Nacional de Transportes Terrestres - ANTT. Estende-se os agradecimentos ao Programa Especial de Treinamento em Engenharia Rodoviária (PETER), ao Laboratório de Pavimentação (LAPAV) e à Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), que oportunizaram a realização desta pesquisa.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARRA. Recommended Mix Design Guidelines For Full Depth Reclamation (FDR) Using Emulsified Asphalt Stabilizing Agent FDR201A. v. 60137, n. 630, 2018.

BERNUCCI, L. B. et al. **Pavimentação Asfáltica: Formação Básica para Engenheiros**. 2° ed. Rio de Janeiro: Petrobras, 2022.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT). **NORMA DNIT 134/2018-ME- Pavimentação-Solos - Determinação do módulo de resiliência - Método de ensaio**. **Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes.** Rio de Janeiro, 2018.

DOLZYCKI, B.; JACZEWSKI, M.; SZYDLOWSKI, C. The long-term properties of mineral-cement-emulsion mixtures. **Construction and Building Materials**, v. 156, p. 799–808, 2017.

FEDRIGO, W. **RECICLAGEM DE PAVIMENTOS COM ADIÇÃO DE CIMENTO PORTLAND: DEFINIÇÃO DAS BASES PARA UM MÉTODO DE DOSAGEM**. [s.l.] Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2015.

GRAZIANI, A. et al. Effect of curing on the physical and mechanical properties of cold-recycled bituminous mixtures. **Materials and Design**, v. 95, p. 358–369, 2016.

MONDAL, P. G.; KUNA, K. K. Mix design considerations for foamed bitumen stabilized materials: A review. **Construction and Building Materials**, v. 326, n. February, p. 126783, 2022.

NIVEDYA, M. K.; RAVINDRAN, P.; MURALI KRISHNAN, J. Experimental investigations and constitutive modeling of bitumen stabilized mixtures. **International Journal of Engineering Science**, v. 102, p. 36–54, 1 maio 2016. SABITA. **Technical Guideline (TG2) : Bitumen Stabilised Materials Southern African Bitumen Association (Sabita)**. 3° ed. [s.l: s.n.], 2020.

WIRTGEN GROUP. **Reciclagem a frio: Tecnologia de reciclagem a frio Wirtgen**. [s.l: s.n.]. 2012. Disponível em: <www.wirtgen.com>.

YAN, J. et al. Early-age strength and long-term performance of asphalt emulsion cold recycled mixes with various cement contents. **Construction and Building Materials**, v. 137, p. 153–159, 2017.

ANEXO V

(Apresentação Artigo: “Reciclagem de pavimentos com emulsão asfáltica: efeito da granulometria e da compactação no comportamento resiliente” 25º ENACOR – Encontro Nacional de Conservação Rodoviária e 48ª RAPv – Reunião Anual de Pavimentação, juntamente com a 4ª ExpoEnacor))

LAPAV
LABORATÓRIO DE PAVIMENTAÇÃO
ESCOLA DE ENGENHARIA - UFRGS

25º ENACOR 48ª RAPv
25º Encontro Nacional de Conservação Rodoviária / 48ª Reunião Anual de Pavimentação

RECICLAGEM DE PAVIMENTOS COM EMULSÃO ASFÁLTICA

EFEITO DA GRANULOMETRIA E DA COMPACTAÇÃO NO COMPORTAMENTO RESILIENTE

Katlin Modesto Dorneles[1]; Lucas Czamanski Meireles[1]; Leonardo Lunkes Wagner[1]; Thaís Radünz Kleinert[1]; Lelio Antônio Teixeira Brito[1]; Washington Peres Núñez[1] & Claudio Renato Castro Dias[2]
[1]Universidade Federal do Rio Grande do Sul & [2]Grupo Ecorodovias

ABPv ABDER DER PARANÁ PARANÁ GOVERNO DO ESTADO SECRETARIA DA INFRAESTRUTURA E LOGÍSTICA

SUMÁRIO

25º ENACOR 48ª RAPv
25º Encontro Nacional de Conservação Rodoviária / 48ª Reunião Anual de Pavimentação

- RECICLAGEM ASFÁLTICA
- MATERIAIS ESTABILIZADOS COM BETUME
- OBJETIVO
- METODOLOGIA
- RESULTADOS
- CONCLUSÕES

ABPv ABDER DER PARANÁ PARANÁ GOVERNO DO ESTADO SECRETARIA DA INFRAESTRUTURA E LOGÍSTICA

RECICLAGEM ASFÁLTICA
FRESAGEM

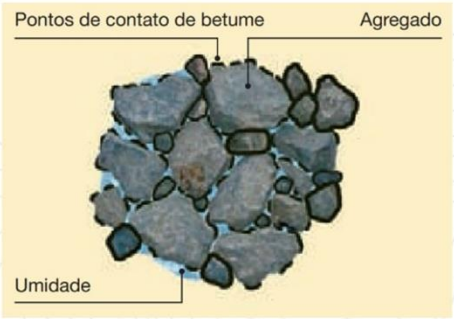


Fonte: Autores, 2023

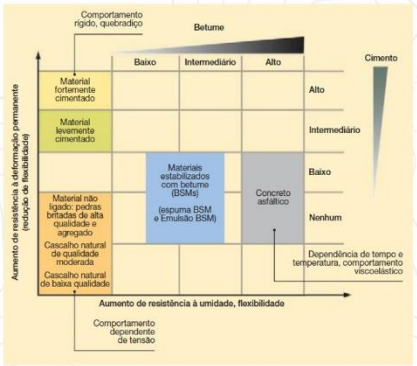


Fonte: Autores, 2023

BITUMEN STABILISED MATERIALS (BSM)
MATERIAIS LIGADOS NÃO CONTINUAMENTE



Fonte: WIRTGEN GROUP, 2012

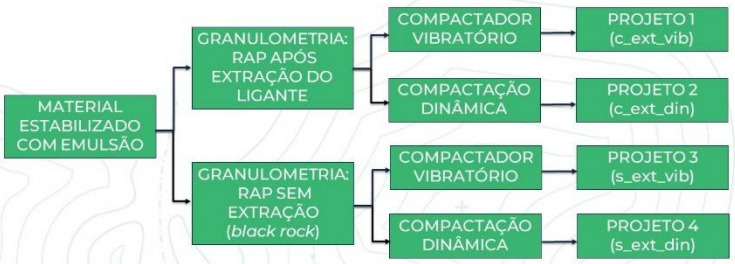


Fonte: WIRTGEN GROUP, 2012

OBJETIVO

Avaliar o efeito da granulometria e do tipo de compactação no comportamento resiliente de misturas recicladas com emulsão asfáltica.

METODOLOGIA





Fonte: Autores, 2022

METODOLOGIA
PROJETO 1 E 2



Fonte: Autores, 2022

METODOLOGIA
PROJETO 3 E 4



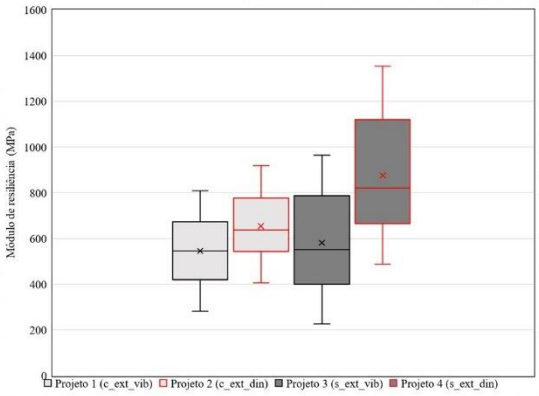
Fonte: Autores, 2022

RESULTADOS
MODELO COMPOSTO

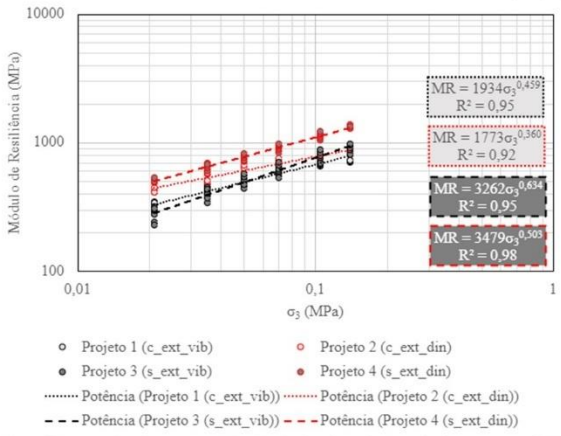
$$MR = k_1 \times \sigma_3^{k_2} \times \sigma_d^{k_3}$$

Onde:
MR – módulo de resiliência, em MPa;
σ3 – tensão confinante, em MPa;
σd – tensão desvio, em MPa.

Projeto	Características	k_1	k_2	k_3	R^2
1	c_ext_vib	1791	0,40	0,03	0,95
2	c_ext_din	1750	0,34	0,02	0,92
3	s_ext_vib	2726	0,47	0,13	0,98
4	s_ext_din	1793	0,32	0,02	1,00



RESULTADOS
MÓDULO DE RESILIÊNCIA X TENSÃO CONFINANTE



CONCLUSÕES

- O modelo composto foi o mais significativo estatisticamente para representar o comportamento do módulo de resiliência das misturas ensaiadas;
- A compactação dinâmica resultou em um melhor comportamento resiliente das misturas, em comparação com a vibratória;
- As amostras consideradas como black rock, ou seja, com granulometria sem a extração do ligante, apresentaram melhores resultados de MR;
- O Projeto 4 (s_ext_din) foi o que apresentou o melhor comportamento resiliente entre os estudados, com os maiores valores de MR.



Katlin Modesto Dorneles
Universidade Federal do Rio Grande do Sul
katlin.dorneles@ufrgs.br

Av. Bento Gonçalves, 9500 Prédio 43816 - Agronomia, Porto Alegre - RS
https://www.ufrgs.br/lapav/
(51) 3308-7049

ANEXO VI

(Folder1º Workshop de Engenharia e Operação Viária de Pelotas)

1° WORKSHOP

ENGENHARIA E OPERAÇÃO VIÁRIA DE PELOTAS

25 de outubro das 08h às 18:40

Inovação em Movimento!

Abertura do credenciamento às 8h

Palestrantes:

09:00 - 09:50 **Projetos de CA com RAP e Bases estabilizadas com emulsão** com **Lélio Brito** - PhD pela Universidade de Nottingham, Professor da UFRGS e Coordenador do LAPAV. Especialista em infraestrutura rodoviária e Diretor Técnico da ABPv e **Claudio Renato Castro Dias** - Gerente de Infraestrutura Rodoviária do Grupo EcoRodovias Mba em gestão empresarial pela FGV e mestre pela UFRGS.

10h - 10:30 Coffee Break

10:30 - 11:20 **Rodovias que perdoam através dos dispositivos de contenção viária** Com **Flavio Patanè** - Responsável Técnico na Empresa Brasileira Lisy Segurança.

11:30 - 12:20 **Panorama das Concessões no Rio Grande do Sul** com **Gabriel Fajardo** – Secretário Adjunto de Parcerias e Concessões

12:30h - 14:00 Almoço gratuito no local.

14h - 14:50 **Inovação e Tendências Tecnológicas** com **Arthur Igreja** - Co-Founder da AAA Plataforma de Inovação

15:00 - 15:50 **Evolução do asfalto borracha e os benefícios da sua utilização com visão em ESG** com **Wander Omena** – Eng. Químico e Gerente de P&D e Inovação da Greca Asfaltos

16:00 - 16:30 Coffee Break

16:30 - 17:20 **Avanços na seleção de materiais asfálticos e no dimensionamento de pavimentos flexíveis Parceria DNIT e UFSM** com **Luciano Specht** - Dr. Eng. Civil e Professor na UFSM

17:30 - 18:20 **Operação de Rodovias Concedidas e Segurança em Obras Rodoviárias** com **Liliane Firmiano** - Gerente de Atendimento ao Usuário Ecosul e **Moises Basilio** - Gerente de Sustentabilidade EcoRodovias

25 de outubro
das 08h às 18:40
Auditório do Sicredi
Av. Dom Joaquim, 1087, Pelotas-RS

Inscrição obrigatória através do QR code!
Vagas limitadas!



Patrocínio: sbs, COPAVI, LAPAV, Sicredi, GRECA, DIEFRA

Realização: ecoSUL

ANEXO VII

(Apresentação “Projetos de CA com RAP e Bases estabilizadas com emulsão” 1° Workshop de Engenharia e Operação Viária de Pelotas)

1° WORKSHOP
ENGENHARIA E OPERAÇÃO VIÁRIA DE PELOTAS
25 de outubro das 08h às 18:40
Inovação em Movimento!

Projetos de CA com RAP e Bases estabilizadas com emulsão

LAPAV | UFRGS

Ecosul | Grupo Ecorodovias

1

1° WORKSHOP
ENGENHARIA E OPERAÇÃO VIÁRIA DE PELOTAS
25 de outubro das 08h às 18:40
Inovação em Movimento!

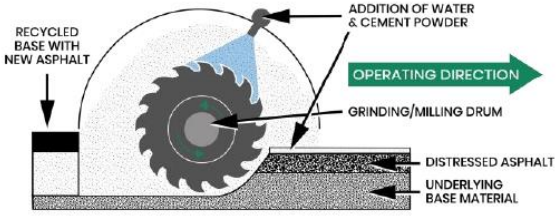
Prof. Lélio Brito, PhD
Eng. Claudio Dias, MSc
Prof. Washington Núñez, Dr
Eng. Leonardo Lunkes Wagner, MSc
Prof. Jorge Ceratti, DSc
Engª Marlova Johnston, Drª
Eng. Daniel Martell, MSc
Engª Thaís Kleinert, Drª
Eng. Márcio Joaquim dos Santos
Eng. William Fedrigo, Dr.
Engª Gracieli Colpo, Drª
Profª Mônica Garcez, Drª
Eng. Henrique Grimm, MSc
Engª Deise Fávero, MSc
Engª Cecília Merighi, MSc

2



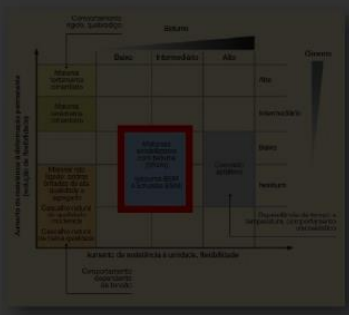


i. O que é reciclagem profunda? (FDR – *Full Depth Reclamation*)
ii. Por que usar?
iii. Desafios



ANTT ecoSUL

3

1.FDR com emulsão asfáltica: Pulveriza e mistura a camada de pavimento com emulsão asfáltica para formar uma base reciclada estabilizada.

2.FDR com cimento: Pulveriza e mistura a camada de pavimento com cimento para criar uma base reciclada durável.

3.FDR com espuma de asfalto: Injeta espuma de asfalto na camada de pavimento pulverizada para estabilizar e fortalecer a base reciclada.

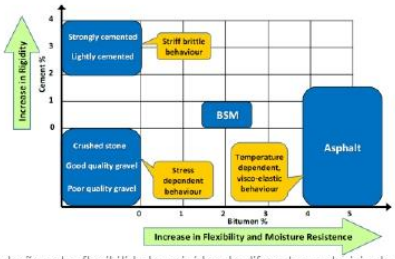
4.FDR com aditivos químicos: Utiliza aditivos químicos, como polímeros e estabilizadores de solo, para melhorar a estabilização e durabilidade da base reciclada

LAPAV

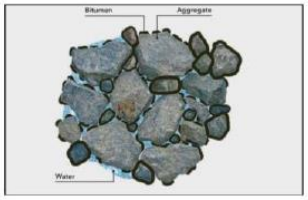
ANTT ecoSUL

4

A amostragem e o projeto de mistura para FDR são diferentes do que para misturas asfálticas aquecidas (HMA e WMA). Com HMA e WMA, ajustes podem ser feitos para alcançar as propriedades desejadas (VV, VAM, etc); com FDR, porém, os ajustes não são rápidos devido à natureza do processo construtivo. Portanto, é importante compreender a variabilidade da estrada e projetar adequadamente antes da construção.



Relação entre flexibilidade e rigidez de diferentes materiais de pavimentação



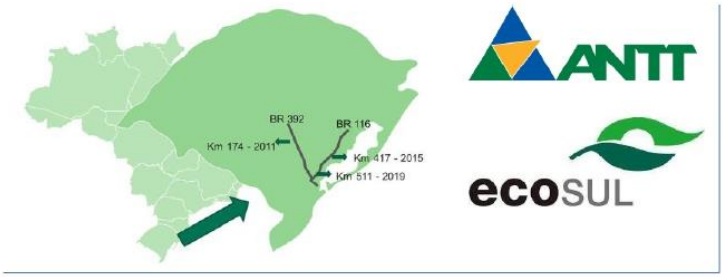
Conceito de "pontos soldados" por asfalto entre partículas de agregados

5





6

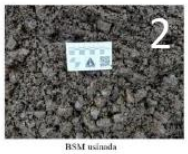




ANTT ecoSUL

7













Km 495 da BR116
Pelotas /RS

ANTT ecoSUL

8

km 417 da BR116



9



10

Desafios



i. Dosagem da mistura
ii. Modos de falha – modelagem
iii. Dimensionamento da camada
iv. Previsão de desempenho na vida útil
v. Estimativa dos impactos no ciclo de vida (ESG)

Normativas ?



i. Procedimento de dosagem
ii. Especificação de ensaios
iii. Especificação de serviço
iv. Procedimento de dimensionamento (Parâmetros)

11

Caracterização dos materiais pétreos

- BGS
  - ✓ Granulometria;
  - ✓ Compactação;
  - ✓ Equivalente de areia;
  - ✓ Abrasão "Los Angeles".
- RAP
  - ✓ Granulometria.

Caracterização das misturas (RAP + BGS + cimento + emulsão)

- ✓ Granulometria;
- ✓ Compactação.

Compactação das misturas

- ✓ $\gamma_{dmáx.}$;
- ✓ *Optimum fluid content* (OFC).

Caracterização da emulsão

- ✓ Viscosidade Saybolt Furol;
- ✓ Sedimentação;
- ✓ Peneiração;
- ✓ Carga de partícula;
- ✓ Teor do resíduo seco;
- ✓ pH.

Fluido (50% água/50% emulsão).

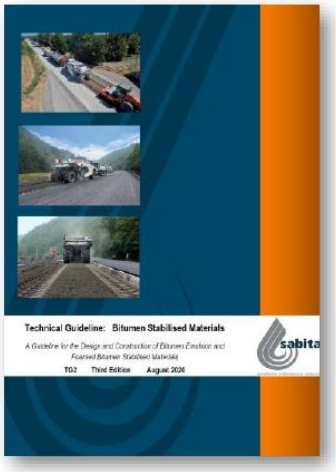


Mistura com 10% de fluido.



12





ARRA:

- Foco específico no uso de agentes estabilizadores à base de emulsão asfáltica no FDR.
- Concentra-se em fornecer diretrizes detalhadas para a seleção e aplicação desses agentes, a fim de obter as propriedades desejadas no pavimento reabilitado.
- Pode ser aplicado em regiões onde o uso de emulsões asfálticas é comum.
- O ARRA fornece orientações específicas para o mix design (dosagem) dos materiais reciclados estabilizados com emulsão asfáltica.

TG2:

- Abrange uma gama mais ampla de materiais estabilizados com betume, incluindo emulsão asfáltica e betume espumado.
- Além da dosagem, o TG2 também aborda a construção e o controle de qualidade dos materiais estabilizados com betume.
- Pode ser aplicado em diferentes contextos e tipos de estabilização com betume, não se restringindo apenas à emulsão asfáltica.
- Fornece diretrizes mais abrangentes para o projeto e a construção de materiais estabilizados com betume, além do mix design



MISTURA -> CURA -> COMPACTÇÃO -> (CONDICIONAMENTO) -> ENSAIO

15

Fresado | Fresado + 1% de cal | Mistura



- A mistura realizada em misturador automático com tempo máximo de 60 segundos.
- Corpos de prova (15 cm de diâmetro e 7,5 ± 0,5 cm de altura) moldados em compactador giratório (ARRA 30 giros).
- Cura de CPs foi de 16 horas a 48 horas à 60°C + 12 horas a 24 horas à 25°C (recomendação da ARRA).

CPs 10 cm ϕ

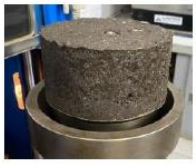


CPs 15 cm ϕ



16







Compactação: Marshall ou Giratório ou Vibratório

(30 Giros ARRA)

17

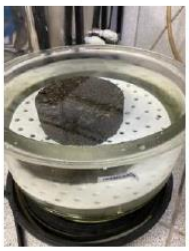
CP 15cm diâmetro x 7,5cm altura



Cura seca

16 horas a 48 horas à 60°C (até constância de massa)
+ 12 horas a 24 horas à 25°C

Saturação do CP







18

Traço A = 55% fresado + brita + cimento



Após retirada das paredes do molde



16 horas em estufa a 40°C



Após 72 horas em estufa a 40°C

19

Traço B = 32% fresado + brita + cimento



Após retirada das paredes do molde



Após 72 horas em estufa a 40°C



Durante o rompimento

20

CPs 150 x 300mm

Ensaios de MR Triaxial
Ensaios de Deformação Permanente
Ensaios de Resistência ao Cisalhamento





21

Test Method	Criteria		Property
	FDR Type 1[1]	FDR Type 2[1]	
Gradation for Design Millings, AASHTO T 11 & T 27 (ASTM C117 & C136)	Report	Report	
Soil Equivalent, AASHTO T 176 (ASTM D2419, Method B)	Report	Report	Suitability of material for emulsified asphalt stabilization
Plasticity Index, AASHTO T 89 & T 90 (ASTM D4318)	Report	Report	Suitability of material for emulsified asphalt stabilization
Modified Proctor, AASHTO T 180 (ASTM D1557, Method C)	Report	Report	Optimum Moisture Content for Density and Compaction Control
Design Moisture Content (Section 3.6)	Report	Report	Dispersion of Emulsion
Bulk Specific Gravity (Density), AASHTO T 331 or T 166 (ASTM D6752 or ASTM D2726)	Report	Report	Density as Compacted
Maximum Theoretical Specific Gravity, AASHTO T 209 (ASTM D2041) or ASTM D6857	Report	Report	Maximum Specific Gravity
Air Voids of Compacted, Cured Samples, AASHTO T 269 (ASTM D3203)	Report Only – Stabilizing agent content should not be adjusted to meet an air void content.	Report Only – Stabilizing agent content should not be adjusted to meet an air void content.	For Calculation of Percent Saturation
Indirect Tensile Strength, AASHTO T 283 (ASTM D4867), psi (kPa)	40 (276) Minimum	35 (241) Minimum	Cured Strength
Conditioned Indirect Tensile Strength, AASHTO T 283 (ASTM D4867), psi	25 (172) Minimum	20 (138) Minimum	Moisture Resistance
Ratio of Residual Emulsified Asphalt to Cement	Minimum 2.5:1.0	Minimum 2.5:1.0	Promote Rapid Setting

FDR Tipo 1 (<8% pass #200)
FDR Tipo 2 (≥8% pass #200)

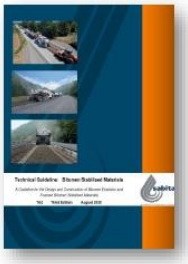
ITSdry ≥ 276kPa (Tipo 1)
ITSwet ≥ 172kPa



Class	RA (%)	ITS (kPa)[1]		Triaxial		
		ITS_{DRY}	ITS_{WET}	Cohesion (kPa)	Friction Angle (°)	Retained Cohesion (%)
BSM 1	< 50%	225	125	250	40	75
	50 – 100%	225	125	265	38	75
BSM 2	< 50%	175	100	200[2]	38	65
	50 – 100%	175	100	225	35	75

BSM Classe 1:
Materiais com **alta resistência ao cisalhamento**. Estes materiais são adequados para a construção da camada de base em pavimentos com uma capacidade estrutural **superior** a 3 milhões de ESALs (onde a modelagem analítica é recomendada para a concepção do pavimento).
BSM Classe 2:
Materiais com **moderada resistência ao cisalhamento**. Estes materiais são adequados para a construção da camada de base de pavimentos com capacidade estrutural **inferior** a 3 milhões de ESALs (onde os métodos empíricos são adequados para conceber o pavimento).

ITSdry ≥ 225kPa (BSM1)
ITSwet ≥ 125kPa



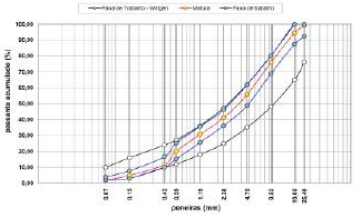
22





Dados:

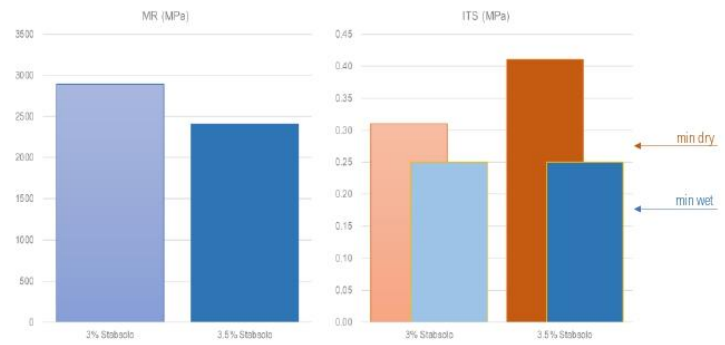
SP021 – Rodoanel
Material fresado
Faixa granulométrica Wirtgen
Teor de ligante no RAP = 3,33%
Teor de Stabsolo = 3,00%
Resíduo de asfalto no Stabsolo = 62%
Teor de água = 2%
Teor de ligante final = 5,19% (3,33% + 62%*3%)



Caracteristicas da Mistura Faixa de Trabalho - Wirtgen			
Ensaio	Valor obtido	Mínimo	Máximo
Teor ótimo residual	5,19%	4,90%	5,40%
Teor ótimo de STABSOLO®	3,00%	2,70%	3,30%
Densidade do ligante	1,000 g/cm³	-	-
Densidade real teórica da mistura	g/cm³	-	-
Densidade real da mistura - Rice - ABNT NBR 15619	2,480 g/cm³	-	-
Densidade aparente do corpo-de-prova - ABNT NBR 15573	2,122 g/cm³	-	-
Vazios (VV)	14,4 %	5,0%	30,0%
Relação Betume Vazios (RBV)	20,9 %	-	-
Vazios do Agregado Mineral (VAM)	18,8 %	-	-
Fluência	6,18 mm	-	-
Estabilidade Marshall (38 °C) - sem Filer	660 kgf	250	-
Estabilidade Marshall (25 °C) - sem Filer	1681 kgf	-	-
Estabilidade Marshall após DUI (25 °C) - sem Filer	553 kgf	-	-
Danos por umidade induzida - sem Filer	32,9%	70	-
Estabilidade Marshall com 1,0% Cimento Portland (38 °C)	761 kgf	250	-
Estabilidade Marshall com 1,0% Cimento Portland (25 °C)	1691 kgf	-	-
Estabilidade Marshall com 1,0% Cimento Portland após DUI (25 °C)	1279 kgf	-	-
Danos por umidade induzida com 1,0% Cimento Portland	75,6%	70	-
Estabilidade Marshall com 1,0% Cal CH-I (38 °C)	547 kgf	250	-
Estabilidade Marshall com 1,0% Cal CH-I (25 °C)	1550 kgf	-	-
Estabilidade Marshall com 1,0% Cal CH-I após DUI (25 °C)	1353 kgf	-	-
Danos por umidade induzida com 1,0% Cal CH-I	87,3%	70	-
Água de Molhagem sobre agregado seco em estufa (%)	2,00 %	-	-

Resultados alcançados com CPs Marshall; 75 golpes por face; variável de referência: maior valor de estabilidade.

Material reciclado + 1% cal + 4% água + 3% e 3,5% STABSOLO®- Compactador giratório 30 giro





misturador automático (60 segundos); CPs 15 cm de diâmetro x 7,5 ± 0,5 cm de altura; moldados no compactador giratório com 30 giros; cura conforme ARRA por 16 horas a 48 horas à 60°C (até constância de massa) + 12 horas a 24 horas à 25°C.

25

Novos desafios





26

... e sobre os projetos de CA com RAP...



ANTT ecoSUL

27

AGRADECIMENTOS

ANTT ecoRODOVIAS GRUPO ecoSUL

BR PETROBRAS anp Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis ingevity

ABPv betunel GRECA ASFALTOS peer

LAPRV DECIV PPGCI UFRGS FUNDAÇÃO LUIZ ENGLERT

ANTT ecoSUL

28



OBRIGADO PELA ATENÇÃO

lelio.brito@ufrgs.br

29

ANEXO VIII

(Folder entregue no XIII WORKSHOP RDT - RECURSOS PARA DESENVOLVIMENTO TECNOLÓGICO)

ESTUDO DE COMPÓSITOS DE CIMENTO, EMULSÃO COM FRESADO ASFÁLTICO E AGREGADOS VIRGENS PARA BASES DE ELEVADO DESEMPENHO

Você sabe o que é a BSM?

No inglês *"Bitumen Stabilization materials"* é um material estabilizado com emulsão asfáltica, apresentando também agregados virgens, fresado e cimento em sua composição.

Este material caracteriza-se por sua utilização a frio, como um processo de reciclagem que pode ocorrer tanto in loco quanto em usina.

Suas propriedades correspondem a um material granular, apresentando pontos de coesão aumentados devido à ação da emulsão asfáltica, proporcionando uma redução na sensibilidade à umidade reduzida, ao comparar com materiais granulares convencionais.

ANTT AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTES TERRESTRES

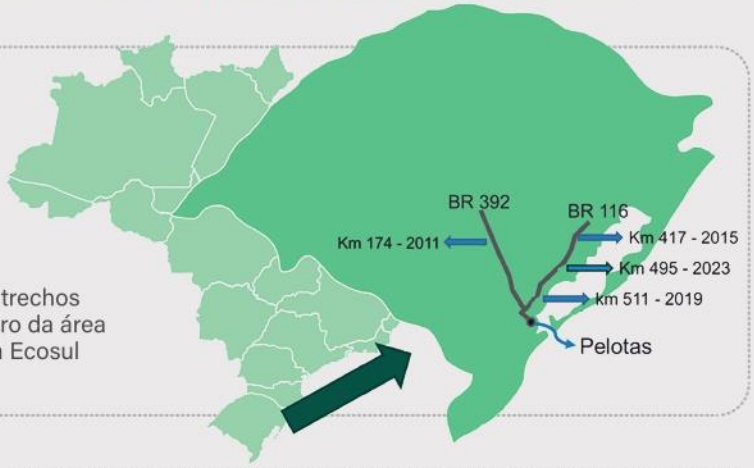
ecoSUL ecoRODOVIAS

No Recurso de Desenvolvimento Tecnológico desenvolvido em parceria com a Ecosul, está em análise uma mistura estabilizada com emulsão, sendo ensaios laboratoriais e de monitoração de dois trechos experimentais em escala real.

O primeiro projeto foi construído no km 495 da BR-116/RS, localizado no Polo Rodoviário Pelotas, da Ecosul e o segundo trecho será solicitado por simulador de tráfego no laboratório de pavimentação (LAPAV) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS).

Adicionalmente, mais três trechos experimentais, construídos em um projeto anterior, estão sendo monitorados ao longo do presente projeto.

Como produto da experiência adquirida neste Recurso de Desenvolvimento Tecnológico, está prevista a elaboração de uma minuta de norma técnica para bases de elevado módulo.



Localização dos trechos experimentais dentro da área de concessão da Ecosul



Ensaios para avaliação do comportamento mecânico na mistura estudada no Recurso de Desenvolvimento Tecnológico



Construção trecho experimental no km 495 da BR-116/RS



Construção da pista experimental LAPAV/UFRGS

@ecosul
@ecosul__
www.ecosul.com.br

0800 724 1066
CANAL EXCLUSIVO
WHATSAPP (53) 2128 4462

ANTT AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTES TERRESTRES
ecoSUL ecoRODOVIAS

ANEXO IX

(Tabela Comparativa de normas e procedimentos)

Identificação			Dosagem					Desempenho				
Norma	Ano	Pais	Tipo	Molde	Compactação	Cura	Limites	Tipo	Molde	Compactação	Cura	Limites
TG2	2020	África do Sul	ITS	150x95	Vibratório	Padrão 72 horas em estufa a 40°C: - Seca: 24 horas a 25°C - Úmida: 24 horas a 25°C submerso	- ITSDRY (kPa) > 225 - ITSWet (KPA) > 125	Triaxial monotônico	150x300	Vibratório	Padrão: - após a moldagem pernoitar dentro do molde - desmoldar e manter 8 horas em estufa a 40°C - ensaca os CP's em estufa 40°C por 48 horas - remover da estufa, mantendo os CP's a 25°C, trocar o saco por sacos secos e realizar o ensaio após 24 horas - 2 Cp's devem ser submersos por 24 horas, correspondente a cura úmida	Ângulo de atrito 40° e Coesão 75%
ARRA CR201	2016	EUA	ITS ou Estabilidade Marshall	Marshall: 100mm x 63,5 ± 2,5 mm - ITS: 150 x 95mm de altura	- Marshall: 75 golpes por face ou com 30 rotações usando um compactador giratório Superpave - ITS: Giratório Superpave	60°C até a constância de massa (mínimo 16 horas e não mais que 48 horas) + 24 horas 25°C	- ITS 310kPa - Estabilidade marshall 5560N	Dano por umidade induzida	- ITS: 150 x 95mm de altura	Giratório	60°C até a constância de massa (mínimo 16 horas e não mais que 48 horas) + 24 horas 25°C	Relação aos limites de ITS
ARRA FDR201A	2018	EUA	ITS	150 x 75 ± 5 mm	30 giros Superpave	60°C até a constância de massa (mínimo 16 horas e não mais que 48 horas) + 24 horas 25°C - para cura úmida: Vácuo e após submersas por 24 horas	- 276 kPa seco - 172 kPa curado	Dois espécimes, com o teor de asfalto emulsionado mais alto ou mais alto e mais baixo, devem ser produzidos para teste de gravidade específica máxima.	-	-	-	Relação aos limites
DNIT 153/2010 – ES	2010	Brasil	Estabilidade e Fluência	1200g com altura 63,5mm+1,3mm	Soquete marshall. 50 ou 75 de cada lado do corpo-de-prova e	-	- Porcentagem de vazios 5 a 30 - Estabilidade, mínima 250 kgf (756 golpes) - Fluência 2,0 - 4,5	-	-	-	-	-

Identificação			Dosagem					Desempenho				
Norma	Ano	Pais	Tipo	Molde	Compactação	Cura	Limites	Tipo	Molde	Compactação	Cura	Limites
Wirtgen	2012	Alemanha	ITS	Amostras com 100 mm ou 150 mm de diâmetro, se 150x95mm	Se 100x63,5 marshall se 150 x 95 modificado	72 horas a 40º C + 24 horas a 25ºC são denominados ITSWET. - Os resultados após imersão em água por 24 horas a 25º C são denominados ITSSOAK.	-ITSdry > 225kPa - ITS wet e soak> 100kPa - ITS equil>175kpa	Triaxial monotônico	Triaxial monotônico	Não especifica	Não especifica	Coesão >250kPa e ângulo >40°
DNER-ME 107/94	1994	Brasil	Estabilidade e Fluência	1200g com altura 63,5mm+1,3mm x diâmetro de 100mm	Soquete Marshall. 50 ou 75 de cada lado do corpo-de-prova e	- Estufas a 60 C por 24horas com os moldes. - 2 horas temperatura ambiente para desmoldar - 2 horas a 40°C antes do ensaio de estabilidade e fluência	Variável de acordo com diferentes normas: DNIT 153/2010 - ES - Porcentagem de vazios 5 a 30 - Estabilidade, mínima 250 kgf (75 golpes) 150 kgf (50 golpes) - Fluência, mm 2,0 - 4,5 150 kgf (50 golpes) - Fluência, mm 2,0 - 4,5	-	-	-	-	-
DNIT 166/2013-ES	2013	Brasil	resistência à tração indireta por compressão diametral seca e saturada	altura 63,5mm+1,3mm x diâmetro de 100mm	a energia de compactação deve ser no mínimo a do ensaio de Proctor Modificado correspondente à massa específica aparente seca máxima	72 horas de cura em estufa a 60 °C	Apresentar o valor mínimo de 0,25 MPa para a resistência à tração indireta seca e de 0,15 MPa para a resistência à tração indireta saturada, a 25 °C;	Duas determinações do módulo de resiliência, em conformidade com a Norma DNIT 135/2010-ME para cada traço de mistura executado	-	-	-	-

Identificação			Dosagem					Desempenho				
Norma	Ano	Pais	Tipo	Molde	Compactação	Cura	Limites	Tipo	Molde	Compactação	Cura	Limites
DNIT 167/2013-ES	2013	Brasil	Compressão Simples	Ø 10 × 20 cm da mistura reciclada	5 camadas de 4 cm, com 41 golpes uniformemente distribuídos por camada e soquete de 4,48 K	Depois da moldagem no campo os corpos de prova devem permanecer por sete dias em câmara úmida, para a cura do cimento;	Verificação das resistências à compressão simples e à tração por compressão diametral, em conformidade com os procedimentos prescritos nas normas DNERME 201/94 e DNER-ME 181/94, respectivamente.	Resistência à tração por compressão diametral	Ø 10 × 20 cm da mistura reciclada	5 camadas de 4 cm, com 41 golpes uniformemente distribuídos por camada e soquete de 4,48 K	Depois da moldagem no campo os corpos de prova devem permanecer por sete dias em câmara úmida, para a cura do cimento;	Verificação das resistências à compressão simples e à tração por compressão diametral, em conformidade com os procedimentos prescritos nas normas DNERME 201/94 e DNER-ME 181/94, respectivamente.
BETUNEL	Sem data	Brasil	- Estabilidade e fluência - RICE	63,5mm+1,3mm x 100mm	Cilindro Marshall e compactar com 75 golpes/face ou compactador giratório SUPERPAVE e compactar com 30 giros	- levar os cilindros com mistura compactada mais o material a ser ensaiado o Rice, para estufa e deixar 24 h a 60°C; - Após retirada dos materiais da estufa, extrair a mistura do CP e deixar descansar até temperatura ambiente - colocar o 1º lote em banho-maria a 40°C durante 2 h (2 CP/ teor) e efetuar rompimento para avaliar Estabilidade Marshall e Fluência;	O procedimento não traz nenhum valor de referência para comparação	- Resistência compressão diametral - DUI	63,5mm+1,3mm x 100mm	Cilindro Marshall e compactar com 75 golpes/face ou compactador giratório SUPERPAVE e compactar com 30 giros	o 2º lote em banho-maria a 25°C durante 2 horas (2 CP/teor) e efetuar rompimento para avaliar compressão diametral; 3.29.3 colocar o 3º lote em banho-maria a 40°C durante 24 horas (2 CP/ teor) e, em seguida, transferir para outro banho-maria deixando 2h a 25°C; efetuar o rompimento para avaliar compressão diametral e determinar o danos por umidade induzida – DUI ;	O procedimento não traz nenhum valor de referência para comparação

ANEXO X

(Ata reunião programação workshop divulgação)

Ata 001/2024

Reunião de alinhamento e discussões Workshop RDT

Participantes:
Claudio Renato Castro Dias
Lélio Antônio Teixeira Brito
Leonardo Lunkes Wagner
Marcio Joaquim dos Santos

Às 13 horas, do dia 08, do mês de maio, do ano de 2024, a equipe do LAPAV, Ecosul e EcoRodovias se reuniu para discutir os preparativos iniciais e alinhamento do Workshop a ser desenvolvido pelo RDT e ampla divulgação dos estudos desenvolvidos e discussão da norma técnica a ser desenvolvida sobre Bases Estabilizadas com Emulsão Asfáltica. No encontro, foi discutido os seguintes tópicos:

Primeiramente os participantes de solidarizam com a ocorrência das cheias no Estado do Rio Grande do Sul, principalmente referente a região metropolitana e região Sul do estado onde é a área de Atuação da Ecosul. Os participantes sugeriram que um dos temas a ser abordado no seminário leve em consideração a temática de mudanças climáticas e a o impacto que a catástrofe ambiental que assolou o estado seja abordada.

Após, o professor XX, fez uma ampla exposição dos tópicos que devem ser abordados no Workshop: Discussão da normativa a ser desenvolvida, criação de grupo de trabalhos com profissionais diretamente ligados a reciclagem de pavimentos. Foi sugerido que os trabalhos sejam desenvolvidos a nível da ABPv. Após as discussões, uma mesa redonda formada por diferentes profissionais e esferas, como por exemplo órgãos fiscalizadores, normativos e empresas debatam abertamente com o publico em geral do workshop os principais pontos que a normativa deve levar em consideração.

Durante do Workshop deve-se ocorrer uma ampla divulgação da BSM, devido a sua aplicação no Brasil, ao qual vem ganhando maiores proporções tanto em concessionárias e mais recentemente em obras públicas.

Os resultados do Projeto RDT devem ser apresentados, considerando comparações com obras típicas em relação as obras com bases estabilizadas com emulsão asfáltica, buscando elucidar o seu comportamento em obras rodoviárias.

Nos próximos dias, deve-se criar um grupo de trabalho para iniciar as discussões de tipo de norma DNIT (método de ensaio, especificação de serviço, procedimento) que será

desenvolvido, especificação de material, amostra, compactação. Um contato com o DNIT deve ser estabelecido, para verificar a necessidade de normativa que é necessitada pelo órgão.

Claudio Dias ressaltou a importância trazer as análises de LCCA. Palestra com o ganho ambiental que a técnica de materiais reciclados com emulsão.

Márcio Joaquim trouxe a informação que há um pré-agendamento para 10 de setembro a realização do Workshop em Pelotas-RS.

Leonardo Lunkes trouxe informações complementares, como a realização de reuniões periódicas para a definição de pontos importantes do Workshop. Definição de grupos de trabalho e o lavramento de ata para registro dos pontos debatidos em todas as reuniões.

Ao final ficou definido que até junho de 2024 deve se ter um esboço inicial da minuta de norma.

Nada mais havendo a tratar, a reunião foi encerrada às 13 horas e 50 minutos.

ANEXO XI

(Artigo: “Impacto do tempo de cura nos parâmetros de resistência de misturas estabilizadas com emulsão asfáltica tipo BSM” 25º ENACOR – XXII Congreso Ibero Latinoamericano del Asfalto)

IMPACTO DO TEMPO DE CURA NOS PARÂMETROS DE RESISTÊNCIA DE MISTURAS ESTABILIZADAS COM EMULSÃO ASFÁLTICA TIPO BSM

Leonardo Lunkes Wagner[1], Marlova Grazziotin Johnston[2], Washington Peres Núñez[3] ,William Fedrigo[4], Cláudio Renato Castro Dias[5], Lélio Antônio Teixeira Brito[6]

[1] Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre/RS, Brasil, leonardo.lunkes@ufrgs.br
[2] Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre/RS, Brasil, marlova.johnston@ufrgs.br
[3] Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre/RS, Brasil, washington.nunez@ufrgs.br
[4] Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre/RS, Brasil, william.fedrigo@ufrgs.br
[5] Grupo Ecorodovias, São Paulo/SP, Brasil, claudio.dias@ecorodovias.com.br
[6] Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre/RS, Brasil, lelio.brito@ufrgs.br

Resumo

A utilização de técnicas de reciclagem a frio utilizando materiais estabilizados com emulsão asfáltica vem ganhando destaque em obras de recuperação de pavimentos no Brasil. A incorporação de RAP (Reclaimed Asphalt Pavement), com ou sem adição de agregados virgens, somada ao uso de cimento Portland e pequenas taxas de emulsão asfáltica, resultam em um material conhecido como *Bitumen Stabilized Material* (BSM). Estes materiais podem ser aplicados tanto a partir da reciclagem in situ, quanto com uso de usina, resultando em um material estabilizado com comportamento semelhante ao dos materiais granulares não ligados, mas com níveis de coesão significativamente aumentados e sensibilidade à umidade reduzida. No Brasil, ainda não há uma normativa nacional para a dosagem destes materiais. Lacunas quanto ao entendimento do ganho de resistência do material ao longo do tempo são relevantes neste contexto. Assim, este trabalho avaliou a resistência à tração indireta (ITS – *Indirect Tensile Strength*) de uma mistura tipo BSM composta por 32% de RAP, 67% agregado virgem, cimento Portland e 3,3% de emulsão asfáltica (ou 2% de asfalto residual). Foram moldados corpos de prova de 150 mm de diâmetro e 95 mm de altura seguindo a metodologia preconizada no TG2. Avaliou-se a influência de diferentes porcentagens de cimento, 0%, 1% e 2%, com cura padrão (72 horas em estufa a 40°Cseguido de 24 horas a temperatura ambiente) e diferentes tempos de cura para misturas compostas com 1% de cimento. Os resultados encontrados demonstram que o aumento do teor de cimento (0% até 2%) para o tempo de cura padrão não apresentou grandes ganhos expressivos de resistência. Já a variação do tempo de cura resulta em um aumento de resistência ao longo do tempo. Corpos de prova com 90 dias de cura ao ar obtiveram uma resistência na tração indireta 40% maior que corpos te prova curado em cura padrão.

Palavras-chave: Compactação Vibratória; BSM; Reciclagem.

1 Introdução

A busca por abordagens mais sustentáveis e ecologicamente corretas na pavimentação vem impulsionando o desenvolvimento de novas tecnologias para a sua construção, manutenção e reabilitação. Estas abordagens mais conscientes são oriundas das pressões ambientais que a indústria da construção como um todo exerce sobre o meio ambiente, levando ao esgotamento

dos recursos naturais, como por exemplo a utilização de agregados na construção dos pavimentos [1]. A indústria dos pavimentos busca a cada dia encontrar maneiras de ser mais sustentável e fazer a reutilização dos resíduos que são gerados [2], [3]. Ao tratar-se diretamente da construção de pavimentos, além da utilização de agregados, a utilização do CAP (cimento asfáltico de petróleo) gera impactos ao meio ambiente e à economia devido ao seu crescente aumento de preço. A substituição do agregado natural por agregado reciclado contribui para a sustentabilidade da construção civil [4].

A reciclagem de pavimentos asfálticos tanto por métodos a frio ou a quente auxiliam na recuperação do pavimento e na reincorporação de materiais que seriam muitas vezes descartados. A reciclagem de pavimento, utilizando técnicas a frio, como forma de reincorporar grandes quantidades de asfalto recuperado, traz benefícios econômicos e ambientais [2], [3], [5]. Diferentes técnicas de reciclagem a frio são encontradas no mercado, sendo uma delas a estabilização de materiais com cimento, cal, emulsão, entre outros ou a sua combinação. A determinação do tipo de reciclagem a frio ou a quente varia com relação a temperatura da mistura, podendo ocorrer tanto *in-plant* (em usinas especiais, onde o material é deslocado até o local onde ocorre a mistura) quanto *in-situ* (no próprio local da reciclagem)[1].

De modo geral, a reciclagem a frio envolve a mistura de agregados virgens juntamente com o Pavimento Asfáltico Recuperado, do inglês, Reclaimed Asphalt Pavement (RAP), à temperatura ambiente adicionando uma pequena quantidade de ligante asfáltico (emulsão/espuma) e material de enchimento ativo (cimento, cal ou afins) [1]. A mistura resulta em materiais estabilizados com betume, do inglês, Bitumen Stabilized Materials (BSMs) [6]. Os BSMs são usados principalmente em projetos de reabilitação de pavimentos onde o desgaste na estrutura do pavimento existente está restrito às camadas superiores. Assim, a maioria dos projetos de BSM realizados nas últimas duas décadas tem se preocupado com a reabilitação e melhoramento de pavimentos (reforço e/ou alargamento) onde o material in situ é reciclado.

A avaliação da ITS é importante pois a mesma corresponde ao método utilizado para dosagem. Por não se ter um consenso entre estudos e pesquisas internacionais sobre métodos de compactação e de cura e parâmetros de avaliação, é interessante avaliar o comportamento na ITS para variação dos tempos de cura e teores de cimento. Estudos similares foram desenvolvidos por Mollenhauer (2023) [5], no entanto limitados a 28 dias.

O presente trabalho teve por objetivo avaliar a resistência à tração indireta de misturas tipo BSM avaliando a variação do período de cura para até 90 dias e teor de cimento em corpos de prova cilíndricos de 150x95mm compactados usando compactador vibratório.

2 Reciclagem de Pavimentos e BSM – Bitumen Stabilized materials

A reciclagem de pavimentos é uma técnica de reabilitação de rodovias que busca a reutilização de materiais já envelhecidos reincorporando os mesmos como novas misturas, adicionando ou não agentes rejuvenescedores, agregados para a correção granulométrica e acréscimo de cimento, cal ou outro aditivo químico [7], [8]

A reutilização de materiais oriundos de reciclagem de pavimentos asfálticos e sua reincorporação nos próprios pavimentos em uma ou mais camadas que o compõem, de modo a melhorar a sua capacidade de carga, é objetivo de diversas pesquisas em todo o mundo. A utilização de agregados virgens, RAP, emulsão e material de enchimento, gera um material estabilizado com comportamento semelhante ao dos materiais granulares não ligados, mas com níveis de coesão significativamente aumentados e sensibilidade à umidade reduzida [6].

O material, após o tratamento com betume apresenta escurecimento na cor, onde o betume se dispersa apenas entre as partículas mais finas, resultando em uma argamassa rica em betume entre as partículas mais grossas. [6].

Os mecanismos de cura, no entanto, não ocorrem diretamente após a compactação, podendo levar semanas ou meses. Isso deve-se a quebra da emulsão, Ph da mistura e partículas finas [9]

3 Materiais e Métodos

A avaliação dos procedimentos de cura e do teor de cimento apresentados neste trabalho foi realizada por meio de análise dos resultados em ensaios de laboratório de resistência à tração indireta (ITS – Indirect Tensile Strength). Os procedimentos seguiram o preconizado no guia Sul Africano TG2 [6], com adaptações feitas a partir do mesmo para obter-se as variações necessárias para as análises.

3.1 Caracterização dos materiais

3.1.1 Agregados

Devido ao fresado não apresentar uma curva granulométrica que se enquadre nas faixas recomendadas pelo TG2, foi necessário realizar sua correção adicionando agregados minerais. Assim, utilizou-se agregados de origem granítica, provenientes da pedreira SBS, localizada em Capão do Leão, no Rio Grande do Sul. As propriedades dos agregados estão apresentadas na Tabela 1 e na Tabela 2.

Tabela 1. Caracterização dos agregados utilizados no estudo

Propriedade	Método	Especificação DNIT	Resultados		
			Brita 1 1/2"	Brita 3/4"	Pó de pedra
Índice de Forma	DNIT-ME 424/20 [10]	> 0,5	-	3,12	-
Equivalente de Areia	DNER-ME 054/97 [11]	≥ 55%	-	-	77%
Desgaste à Abrasão	DNER-ME 035/98 [12]	≤ 50%	24,76%	23,80%	-
Durabilidade pelo emprego de soluções de sulfato de sódio	DNER-ME 089/94 [13]	≤ 12%	-	-	-
Propriedade	Método	Especificação ABNT	Resultados		
			Brita 1 1/2"	Brita 3/4"	Pó de pedra
Adesividade à emulsão asfáltica	NBR 6300/2009 [14]	Satisfatório	-	Satisfatório	-
Adesividade à emulsão asfáltica	NBR 14249/2007 [15]	Satisfatório		Satisfatório	
Reatividade Azul de Metileno	NBR 14949/2017 [16]				2,5

Tabela 2. Massas específicas e absorção dos agregados utilizados no estudo

Propriedade	Método	Resultados		
		Brita 1 1/2"	Brita 3/4"	Pó de pedra
Massa Esp. Real- Agregado Graúdo (g/cm^3)	DNER-ME 081/98 [17]	2,628	2,645	-
Massa Esp. Real- Agregado Miúdo (g/cm^3)	DNER-ME 084/95 [18]	-	-	1,880
Massa Esp. Aparente do Grão (g/cm^3)	DNER-ME 081/98 [17]	2,605	2,576	-
Absorção (%)	DNER-ME 081/98 [17]	0,34	1,01	-

A composição granulométrica da BSM utilizada nesse estudo é composta por 32% de RAP, 39% de pó de Brita e 28% de Brita 1 ½", cimento e uma taxa de 2% de asfalto residual da emulsão. A Figura 1 apresenta a curva granulométrica obtida para a composição, com limites de faixas conforme o preconizado pelo TG2. A densidade obtida no ensaio de compactacao, usando a

energia modificada, foi de 2069 kg/m³ correspondente ao teor de umidade otimo de 7,9% e o equivalente de areia foi de 71,6%.

Realizou-se ensaios com 0%, 1% e 2% de cimento Portland do tipo CP II F classe 32 [19]. A sua composição é uma combinação de clinquer (71% - 94%), material pozolânico (6% - 14%) e material carbonático (0% - 15%).

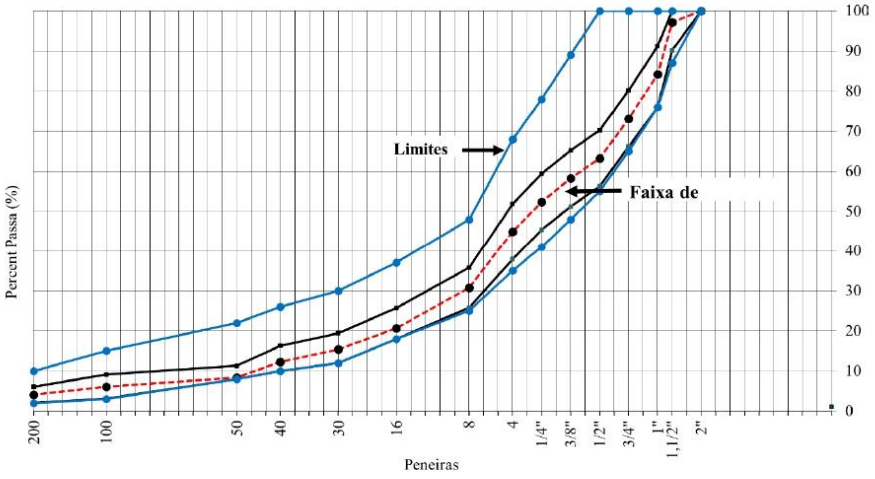


Figura 1. Composição granulométrica da BSM

Após realizada a secagem e o quarteamento do material, realizou-se a composição da mistura conforme indicado anteriormente. Devido à mistura apresentar entre 10% e 30% de material retido na peneira de 19 mm, realizou-se um procedimento de recomposição da mistura, conforme preconizado na NBR 6457 Amostras de Solo – Preparação para ensaio de compactação e ensaios de caracterização [20]. Assim, removeu-se os agregados da mistura retidos na peneira de 19,1 mm através da peneira de 76,2 mm, desprezando o material retido nesta última. O material da composição retido na peneira de 19,1 mm foi substituído por igual quantidade de material retido na peneira de 4,8 mm e que passante na peneira de 19,1 mm.

3.1.2 Emulsão asfáltica

A emulsão utilizada corresponde a uma emulsão EARP (Emulsão Asfáltica para Reciclagem Profunda) conforme as especificações da ANP [21]. A Tabela 3 apresenta as características da emulsão utilizada, fornecida pela distribuidora.

Tabela 3. Características da emulsão EARP

Ensaios sobre a emulsão	Método de ensaio IBP / ABNT	ESPECIFICAÇÃO		Resultado
		Mínima	Máxima	
Viscosidade Saybolt Furol, 50 C, s	NBR 14491 [22]	-	70	26
Sedimentação, 5 dias, % peso	NBR 6570 [23]	-	5	1,4
Peneiração, retido, 0.84mm, % peso	NBR 14393 [24]	-	0,1	0,01
Carga de partícula	NBR 6567 [25]	Positiva	-	Positiva
Resíduo Seco, % peso	NBR 14376 [26]	58	-	58,8

3.2 Mistura e compactação

Todo o material, antes de ser pesado nas porcentagens da mistura, foi completamente seco, onde os agregados virgens foram secos a 105 ± 2 °C e o RAP seco a 40 ± 2 °C. Após a pesagem, a composição foi mantida em estufa a 40 ± 2 °C, para garantir que o que o teor de água utilizado seria alcançado.

A mistura de cada corpo de prova foi realizada individualmente e manualmente a temperatura ambiente. O procedimento de mistura consistiu em realizar a mistura dos agregados virgens e RAP com o cimento, nas taxas de 0%, 1% e 2% em relação ao peso total dos agregados. Após era adicionada a água correspondente. O teor de água adicionado correspondeu ao teor ótimo de umidade obtido no ensaio de compactação descontando-se o teor de água da emulsão utilizada. Após adicionar a água, era adicionada a emulsão, sendo realizada a homogeneização do material até o completo recobrimento dos agregados. A Figura 2 apresenta uma mistura correspondente ao material após a homogeneização dos agregados com 2% de asfalto residual e 1% de cimento.



Figura 2: BSM homogeneizada

Após a mistura, os corpos de prova foram compactados em um molde tripartido por meio de um compactador vibratório de 23 J, com características conforme a Tabela 4 e Figura 3, com tempo de compactação limitado a 2 minutos. Utilizou-se um molde tripartido de 150 mm de diâmetro e 95 mm de altura, conforme o preconizado pelo TG2 [6]. Após a compactação, os corpos de prova foram retirados do molde e pesados.

Tabela 4. Dados compactador vibratório

Dados compactador vibratório	
Potencia Nominal Absorvida	1.700w
Energia de impacto	23 J
Dimensões da Ferramenta (Comprimento)	290 mm
Número máx. de impactos	900 - 1.700 i.p.m
Peso	11,4 kg
Dimensões da ferramenta (largura)	110 mm
Dimensões da ferramenta (Altura)	236 mm
Suporte da ferramenta	SDS máx.
Valores totais de vibração (Cinzelamento)	
Valor de emissão de vibração ah	8 m/s²
Incerteza K	1,5 m/s²
Cinzelamento	
Valor de emissão de vibração ah	8 m/s²
Incerteza K	1,5 m/s²



Figura 3. Compactador vibratório e molde tripartido

3.3 Condições de cura e teores de cimento

Um conjunto de 18 corpos de prova foram moldados com 0%, 1% e 2% de cimento, e submetidos a cura padrão conforme o TG2. Também, foram moldados mais 30 corpos de prova com teor de 1% de cimento, para avaliação de diferentes condições de cura. Os procedimentos de cura utilizados para esses conjuntos de corpos de prova foram cura padrão conforme o TG2, cura ao

ar até constância de massa, cura padrão + 30 dias ao ar a 25 °C, cura padrão + 60 dias ao ar a 25 °C e cura padrão + 90 dias ao ar a 25 °C. Salienta-se que após os períodos de cura, para cada conjunto de 6 corpos de prova, 3 foram rompidos para determinação da resistência à tração indireta (ITS) sob condição seca em temperatura ambiente e 3 corpos de provas rompidos após 24 horas submersos em água. A Figura 4 apresenta um corpo de prova com 1% de cimento após ser retirado do molde e após a cura padrão em estufa.



Após retirada das paredes do molde

Após 72 horas em estufa a 40°C

Figura 4: Corpo de prova após retirado do molde e após a cura padrão

Para se ter uma avaliação do comportamento do material frente a condições adversas, como mais um procedimento de cura, seis corpos de prova foram moldados com 1% de cimento, ao qual foram condicionados, conforme a norma DNIT 180/2018-ME [27] para determinação do Dano por Umidade Induzida (DUI).

A cura padrão, como aqui será denominada, é utilizado no manual TG2 [6], onde, uma vez extraídos os corpos de prova de seus respectivos moldes e marcados, são colocados em estufa a 40 °C (±1 °C) e período mínimo de 72 horas (3 dias). A cura das amostras para ITS produz a condição "Seca" para teste. Isso difere das amostras triaxiais. Após 72 horas, retirar as amostras da estufa e pesar cada uma, registrando a massa individual. Retornar todas as amostras ao forno a 40 °C por mais 4 horas e repetir o processo de pesagem. Se a massa de qualquer amostra diminuir em mais de 10 g, colocar todas as amostras novamente no forno por mais 24 horas. Este procedimento é repetido quantas vezes for necessário até que os corpos de prova atinjam massa constante.

A Figura 5 apresenta o ensaio de ITS sendo realizado. O equipamento utilizado aplica uma carga de 0,1kN á a mostra por meio de duas placas de carga, em aço temperado, 19 mm × 20 mm × 220 mm, com a face retificada de 19 ± 0,1 mm côncava com um raio de 76 ± 1 mm, juntamente com guias verticais da estrutura, 10 mm × 10 mm × 175 mm, de aço macio fixado a uma placa de base, de aço macio de projeto adequado para alinhar as placas de carga no corpo de prova. A amostra é carregada a uma taxa constante de 50 ± 5 mm/min até que a carga máxima seja atingida [6], [28] .



Figura 5: Realização do ensaio de ITS

4 Análises e Resultados

Todos os corpos de prova antes de serem ensaiados foram avaliados quanto a densidade e ao grau de compactação. Cada conjunto de seis corpos de prova, correspondente a um nível de cura para o ensaios de ITS na condição seca e úmida em triplicata, foram avaliados conforme o procedimento utilizado no TG2, considerando um outlier crítico de 1,822 para cada conjunto de seis amostras [6]. Referente ao grau de compactação, levando-se em consideração os outliers, todos os corpos de prova apresentaram valores entre 98% e 102%. Os corpos de prova que ficaram fora, destas duas avaliações, foram descartados, e novos corpos de prova foram moldados em substituição aos mesmos, e realizados novamente as verificações pertinentes.
O TG2 indica que os corpos de prova ensaiados para determinação da resistência à tração indireta devem apresentar valores mínimos conforme a Tabela 5. Para o presente trabalho, considerou-se que o material estudado corresponde a classe BSM1, que são materiais com alta resistência ao cisalhamento. Estes materiais são adequados para a construção da camada de base em pavimentos com uma capacidade estrutural superior a 3 milhões de ESALs (carga equivalente por eixo único) [29].

Tabela 5. Classificação dos BSM conforme a ITS

Classe	ITS (kPa)	
	Seco	Úmido
BSM 1	>225	>125
BSM 2	>175	>100

Fonte: Adaptado de [6]

4.1 Avaliação da ITS para diferentes teores de cimento

Após realizado o procedimento de moldagem, cura e compactação, os 3 conjuntos de 6 corpos de prova referentes aos teores de 0%, 1% e 2% de cimento foram ensaiados (três corpos de prova na condição de cura seca e três na condição de cura submersa).
A Figura 6 apresenta as médias obtidas para os diferentes teores de cimento. Observa-se que mesmo alterando os teores, não se obteve um aumento expressivo da resistência para a cura padrão de 72horas em estufa + 24 horas a 25 °C.

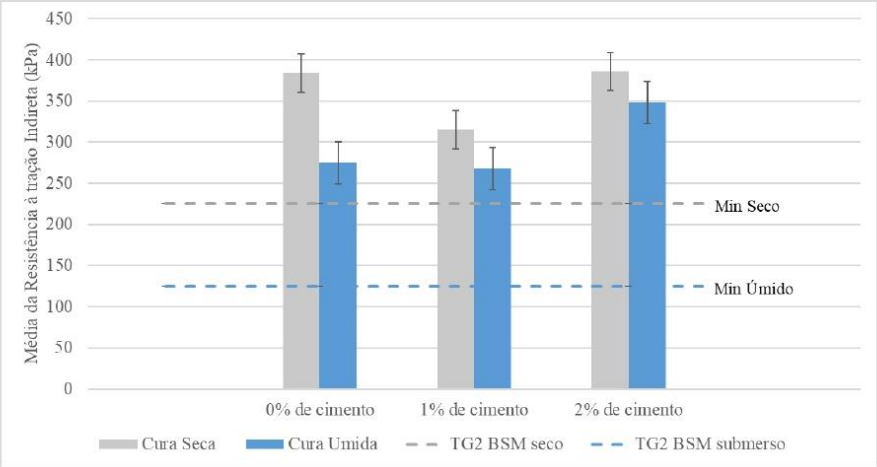


Figura 6: Resultados variação do teor de cimento em BSM

A opção de realizar os demais ensaios de variação de cura com 1% de cimento, deveu-se primeiramente por ser o teor indicado pelo TG2 como o teor limite de cimento a ser utilizado, bem como do cimento auxiliar na produção da mistura. Observou-se no procedimento de moldagem dos corpos de prova, que a utilização da taxa de 1% de cimento melhorou a trabalhabilidade da mistura, fazendo com que a água incorporada + emulsão adicionada, ficassem bem homogênea ao material.

4.2 Avaliação da ITS dos diferentes tempos de cura

A figura 7 apresenta a avaliação das variações do tempo de cura, para o material moldado com a taxa de 1% de cimento e 2% de emulsão residual. Observa-se que há um ganho da resistência à tração indireta ao longo do tempo. Observa-se que comparando a cura padrão com a cura após 90 dias, obteve-se um acréscimo de 40% na resistência à tração indireta.
Na avaliação adicional, referente ao DUI, observou-se que as resistências médias obtidas para o material foram elevadas na condição não condicionada. Já para a resistência média obtida para o ensaio após o condicionamento, observa-se que o material apresentou resistências menores quando comparada para curas de 30 dias, 60 dias e 90 dias. Referente a relação entre o ensaio condicionado e não condicionado obteve-se uma relação de 66%, ou seja, abaixo do esperado pelo TG2. No entanto, ainda assim, a mesma se apresenta bem acima do valor mínimo.
Para a cura realizada completamente ao ar, obteve-se a menor ITS, no entanto, mesmo assim, foi possível obter os valores mínimos preconizados pelo TG2, conforme a Tabela 5.

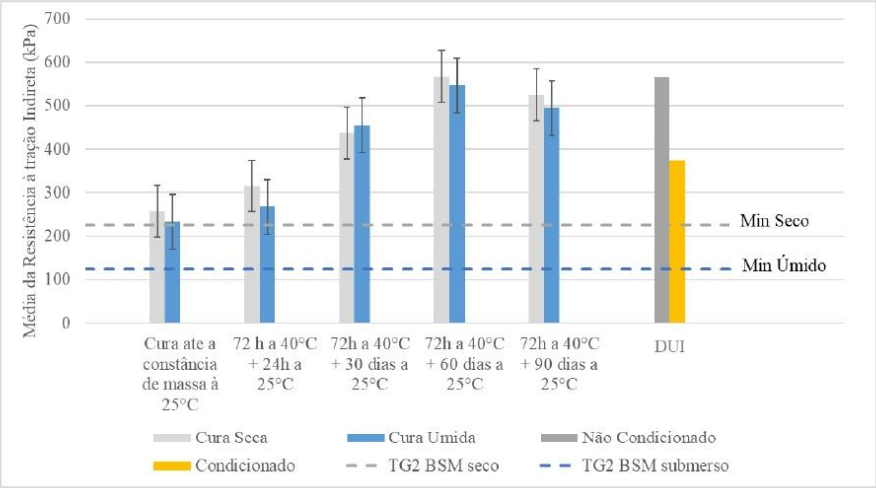


Figura 7: Avaliação do período de cura para a BSM

5 Conclusões

A busca por compreender o comportamento de misturas estabilizadas com emulsão asfáltica, ainda carece de estudos. A utilização deste material como bases de pavimentos torna-se interessante, pois possui resistências melhoradas pela estabilização do material.

No presente trabalho, avaliou-se a variação do teor de cimento em uma mistura estabilizada com 2% de ligante asfáltico residual (teor de emulsão de 3,34%), bem como a variação dos tempos e condições de cura para uma mistura com 2% de ligante asfáltico residual e taxa fixada de 1% de cimento.

Observou-se que teores crescentes de 0%, 1% e 2% de cimento não ocasionaram ganho expressivo de resistência, sendo que 0% de cimento apresentou uma resistência media maior que 1% de cimento. A utilização de taxas baixas de cimento é justificada pois a mesma auxilia na criação de pequenos pontos de coesão, na ruptura da emulsão e no ajuste granulométrico, sendo, no entanto, não preponderante para a cimentação da mistura. Optou-se por não utilizar taxas maiores do que 1% de cimento, justamente por se entender que o material não possui a característica de um material cimentado e sim um material granular com pontos de coesão aprimorados.

Referente a variação dos períodos de cura, ficou evidente que mesmo com taxas de cimento de 1% com relação ao peso total da amostra, há um ganho de resistência à tração indireta com o passar do tempo. Para a cura padrão consegue-se obter plenamente as resistência mínimas preconizados no TG2 [6], contudo, aos 90 dias se tem um acrescimento de 40% na resistência à tração indireta do mesmo material. ,

Ao ser submetido ao procedimento de cura para o dano por umidade induzida, a resistência obtida para a condição condicionada, foi superior tanto para a cura padrão úmida, quanto para a condição mínima preconizada.

Estas constatações sugerem que o material possui uma notável resistência a tração indireta, evidenciada pelo incremento de resistência ao longo do período avaliado. Também, conclui-se, que esses resultados indicam não apenas uma resposta positiva às condições adversas, mas também ressaltam o comportamento do material a diferentes protocolos de cura.

Agradecimentos

Os autores agradecem a à concessionária ECOSUL que forneceu o material para o estudo, parte de uma pesquisa RDT aprovada pela ANTT, bem como ao Laboratório de Pavimentação de UFRGS que permitiu a execução do estudo.

Referências Bibliográficas

[1] P. G. Mondal and K. K. Kuna, "Mix design considerations for foamed bitumen stabilized materials: A review," *Construction and Building Materials*, vol. 326. Elsevier Ltd, Apr. 04, 2022. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2022.126783.

[2] M. J. Martínez-Echevarría, R. M. Recasens, M. Del Carmen Rubio Gámez, and A. M. Ondina, "In-laboratory compaction procedure for cold recycled mixes with bituminous emulsions," *Constr. Build. Mater.*, vol. 36, pp. 918–924, Nov. 2012, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2012.06.040.

[3] C. Mignini, F. Cardone, and A. Graziani, "Complex modulus of cement-bitumen treated materials produced with different reclaimed asphalt gradations," *Mater. Struct. Constr.*, vol. 55, no. 7, Sep. 2022, doi: 10.1617/s11527-022-02009-4.

[4] M. J. Martinez-Echevarria *et al.*, "Crushing treatment on recycled aggregates to improve their mechanical behaviour for use in unbound road layers," *Constr. Build. Mater.*, vol. 263, Dec. 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.120517.

[5] K. Mollenhauer *et al.*, "Cold recycled asphalt for pavements with optimized resource and Cold recycled asphalt for pavements with optimized resource and energy efficiency : proposal for harmonized mix and pavement energy efficiency : proposal for harmonized mix and pavement desig," *Transp. Res. Procedia*, vol. 72, no. 2022, pp. 3031–3038, 2023, doi: 10.1016/j.trpro.2023.11.851.

[6] SABITA, *Technical Guideline (TG2) : Bitumen Stabilised Materials Southern African Bitumen Association (Sabita)*, 3°., no. August. 2020.

[7] W. Fedrigo, "RECICLAGEM DE PAVIMENTOS COM ADIÇÃO DE CIMENTO PORTLAND: DEFINIÇÃO DAS BASES PARA UM MÉTODO DE DOSAGEM," Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2015.

[8] L. B. Bernucci, L. M. G. da Motta, J. B. Soares, and J. A. P. Ceratti, *Pavimentação Asfáltica: Formação Básica para Engenheiros*, 2°. Rio de Janeiro: Petrobras, 2022.

[9] A. Graziani, C. Godenzoni, F. Cardone, and M. Bocci, "Effect of curing on the physical and mechanical properties of cold-recycled bituminous mixtures," *Mater. Des.*, vol. 95, pp. 358–369, 2016, doi: 10.1016/j.matdes.2016.01.094.

[10] DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT), "DNIT-ME 424: Pavimentação – Agregado – Determinação do índice de forma com crivos – Método de ensaio," p. 7, 2020.

[11] DNER - DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM, "DNER-ME 054: Equivalente de areia." pp. 01–10, 1997.

[12] DNER - DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM, "DNER-ME 035: Agregados - determinação da abrasão 'Los Angeles.'" 1998.

[13] DNER - DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM, "DNER-ME 089: Agregados - Avaliação da durabilidade pelo emprego de soluções de sulfato de sódio ou de magnésio." 1994.

[14] ABNT, "NBR 6300: Emulsões asfálticas catiônicas — Determinação da resistência à água (adesividade) em agregados graúdos Asphalt," *Associação Brasileira de Normas Técnicas*, vol. 16501. Rio de Janeiro, p. 4, 2009.

[15] ABNT, "NBR 14249 Emulsão asfáltica catiônica – Determinação expedita da resistência à água (adesividade) sobre agregados graúdos," p. 14249, 2007.

[16] ABNT, "NBR 14949: Microrrevestimentos asfálticos - Caracterização da fração fina por meio da absorção de azul de metileno .," *Assoc. Bras. Normas Técnicas*, p. 16, 2017.

[17] DNER - DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM, "DNER-

ME 081: Agregados - determinação da absorção e da densidade de agregado graúdo.," *Dnit*, pp. 01–06, 1998.
[18] DNER - DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM, "DNER-ME 084: Agregado miúdo - determinação da densidade real," *Agreg. miúdo - Determ. da densidade real*, pp. 93–95, 1995.
[19] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, "NBR 16697 - Cimento Portland - Requisitos." 2018.
[20] ABNT, "NBR 6457: Amostras de solo — Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização." Rio de Janeiro, p. 8, 2016.
[21] ANP, "CARACTERISTICAS DAS EMULSÕES ASFÁLTICAS PARA SERVIÇOS DE RECICLAGEM DE REVESTIMENTO, RECICLAGEM PROFUNDA E ESTABILIZAÇÃO." p. 2022, 2022.
[22] Associação Brasileira de Normas Técnicas, "ABNT NBR 14491: Emulsões asfálticas — Determinação da viscosidade Saybolt Fur," 2007.
[23] Associação Brasileira de Normas Técnicas, "ABNT NBR 6570 Ligantes asfálticos — Determinação da sedimentação e estabilidade à estocagem de emulsões asfálticas," *Assoc. Bras. Normas Técnicas*, p. 8, 2016.
[24] Associação Brasileira de Normas Técnicas, "ABNT NBR 14393: Emulsões asfálticas — Determinação da peneiração," *Assoc. Bras. Normas Técnicas*, p. 27, 2012.
[25] Associação Brasileira de Normas Técnicas, "ABNT NBR 6567 Ligantes asfálticos — Emulsões asfálticas — Determinação da carga de partícula," *Assoc. Bras. Normas Técnicas*, p. 8, 2015.
[26] Associação Brasileira de Normas Técnicas, "ABNT NBR 14376 Ligantes asfálticos — Determinação do teor do resíduo seco de emulsões asfálticas convencionais ou modificadas — Métodos expeditos," *Assoc. Bras. Normas Técnicas*, vol. 16501, p. 209, 2019.
[27] DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT), "Norma DNIT 180/2018-ME Pavimentação - Misturas asfálticas - Determinação do dano por umidade induzida – Método de Ensaio," *Dep. Nac. Infraestrutura Transp.*, p. 9, 2018.
[28] C. R. C. Dias *et al.*, "Bitumen stabilized materials as pavement overlay: Laboratory and field study," *Constr. Build. Mater.*, vol. 369, no. September 2022, 2023, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2023.130562.
[29] Wirtgen Group, *Reciclagem a frio: Tecnologia de reciclagem a frio Wirtgen*. 2012. [Online]. Available: www.wirtgen.com

ANEXO XII

(Apresentação PAVING EXPO 2023)

Resultados de estudos de laboratório com amostras do processo FDR

Prof. Lélio Brito, LAPAV | UFRGS





Osvaldo Tuchumantel Junior

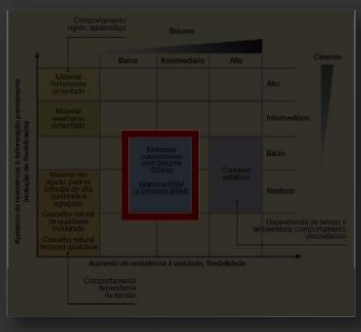


Gracieli Bordin Colpo

betunel

PAVING EXPO 2023 MAIO 24-26





1.FDR com emulsão asfáltica: Pulveriza e mistura a camada de pavimento com emulsão asfáltica para formar uma base reciclada estabilizada.

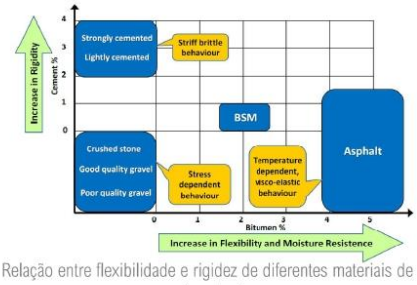
2.FDR com cimento: Pulveriza e mistura a camada de pavimento com cimento para criar uma base reciclada durável.

3.FDR com espuma de asfalto: Injeta espuma de asfalto na camada de pavimento pulverizada para estabilizar e fortalecer a base reciclada.

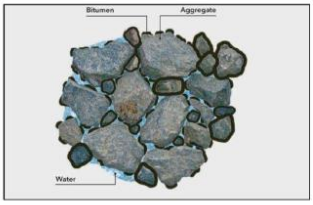
4.FDR com aditivos químicos: Utiliza aditivos químicos, como polímeros e estabilizadores de solo, para melhorar a estabilização e durabilidade da base reciclada

PAVING EXPO 2023 MAIO 24-26

A amostragem e o projeto de mistura para FDR são diferentes do que para misturas asfálticas aquecidas (HMA e WMA). Com HMA e WMA, ajustes podem ser feitos para alcançar as propriedades desejadas (VV, VAM, etc); com FDR, porém, os ajustes não são rápidos devido à natureza do processo construtivo. Portanto, é importante compreender a variabilidade da estrada e projetar adequadamente antes da construção.



Relação entre flexibilidade e rigidez de diferentes materiais de pavimentação



Conceito de "pontos soldados" por asfalto entre partículas de agregados



Recommended
Mix Design Guidelines
For
Full Depth Reclamation (FDR)
Using Emulsified Asphalt Stabilizing Agent
FDR201A

7/27/2018

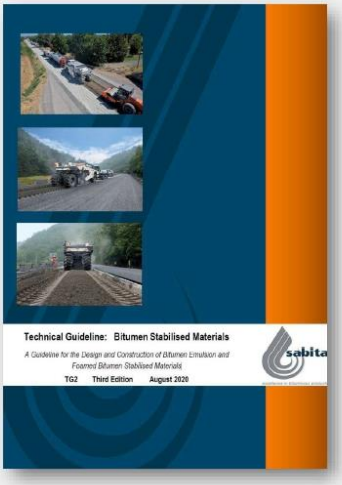
ARRA

Responsible Renewal. Reliable Results.

NOTICE

It is not intended or recommended that these guidelines be used verbatim within a specification. Owner Agencies should use them to help establish their particular project specification. Owner Agencies should understand that all geographical areas and pavement rehabilitation/preservation projects are unique and the availability of materials and equipment may vary as well. ARRA assumes no liability for utilization of these guidelines by any individual or entity. Contact ARRA for answers to questions and for a list of ARRA member Contractors and Suppliers.

Asphalt Recycling & Reclaiming Association
800 Roosevelt Road, Building C-312
Glen Ellyn, IL 60137
(630) 942-6578
www.ARRA.org



Technical Guideline: Bitumen Stabilised Materials

A Guideline for the Design and Construction of Bitumen Emulsion and Foamed Bitumen Stabilised Materials

TG2 Third Edition August 2020

sabita

ARRA:

•Foco específico no uso de agentes estabilizadores à base de emulsão asfáltica no FDR.

•Concentra-se em fornecer diretrizes detalhadas para a seleção e aplicação desses agentes, a fim de obter as propriedades desejadas no pavimento reabilitado.

•Pode ser aplicado em regiões onde o uso de emulsões asfálticas é comum.

•O ARRA fornece orientações específicas para o mix design (dosagem) dos materiais reciclados estabilizados com emulsão asfáltica.

TG2:

•Abrange uma gama mais ampla de materiais estabilizados com betume, incluindo emulsão asfáltica e betume espumado.

•Além da dosagem, o TG2 também aborda a construção e o controle de qualidade dos materiais estabilizados com betume.

•Pode ser aplicado em diferentes contextos e tipos de estabilização com betume, não se restringindo apenas à emulsão asfáltica.

•Fornece diretrizes mais abrangentes para o projeto e a construção de materiais estabilizados com betume, além do mix design



MISTURA -> CURA -> COMPACTÇÃO -> (CONDICIONAMENTO) -> ENSAIO

Fresado



Fresado + 1% de cal



Mistura



- A mistura realizada em misturador automático com tempo máximo de 60 segundos.
- Corpos de prova (15 cm de diâmetro e 7,5 ± 0,5 cm de altura) moldados em compactador giratório (ARRA 30 giros).
- Cura de CPs foi de 16 horas a 48 horas à 60°C + 12 horas a 24 horas à 25°C (recomendação da ARRA).

CPs 10 cm ϕ

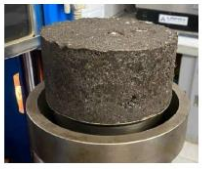


CPs 15 cm ϕ









Adicionar foto giratório



Compactação: Marshall ou Giratório ou Vibratório

(30 Giros ARRA)

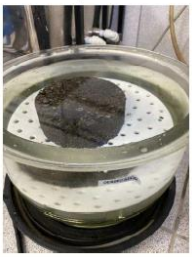
CP 15cm diâmetro
x 7,5cm altura



16 horas a 48 horas à 60°C (até constância de massa)
+ 12 horas a 24 horas à 25°C

Cura seca

Saturação do CP









Traço A = 55% fresado + brita + cimento



Após retirada das paredes do molde



16 horas em estufa a 40°C



Após 72 horas em estufa a 40°C

PAVING EXPO 2023 MAIO 24 - 26

Traço B = 32% fresado + brita + cimento



Após retirada das paredes do molde



Após 72 horas em estufa a 40°C



Durante o rompimento

PAVING EXPO 2023 MAIO 24 - 26

CPs 150 x 300mm

Ensaios de MR Triaxial
Ensaios de Deformação Permanente
Ensaios de Resistência ao Cisalhamento





PAVING EXPO 2023 MAIO 24 - 26

Test Method	Criteria		Property
	FDR Type 1[1]	FDR Type 2[1]	
Gradation for Design Millings, AASHTO T 11 & T 27 (ASTM C117 & C136)	Report	Report	
Sand Equivalent, AASHTO T 176 (ASTM D2419, Method B)	Report	Report	Suitability of material for emulsified asphalt stabilization
Plasticity Index, AASHTO T 89 & T 90 (ASTM D4318)	Report	Report	Suitability of material for emulsified asphalt stabilization
Modified Proctor, AASHTO T 299 (ASTM D1557, Method C)	Report	Report	Optimum Moisture Content for Density and Compaction Control
Design Moisture Content (Section 3.6)	Report	Report	Dispersion of Emulsion
Bulk Specific Gravity (Density), AASHTO T 331 or T 166 (ASTM D6752 or ASTM D2726)	Report	Report	Density as Compacted
Maximum Theoretical Specific Gravity, AASHTO T 209 (ASTM D2041) or ASTM D6857	Report	Report	Maximum Specific Gravity
Air Voids of Compacted, Cured Samples, AASHTO T 269 (ASTM D3203)	Report Only – Stabilizing agent content should not be adjusted to meet an air void content.	Report Only – Stabilizing agent content should not be adjusted to meet an air void content.	For Calculation of Percent Saturation
Indirect Tensile Strength, AASHTO T 283 (ASTM D4867), psi (kPa)	40 (276) Minimum	35 (241) Minimum	Cured Strength
Conditioned Indirect Tensile Strength, AASHTO T 283 (ASTM D4867), psi	25 (172) Minimum	20 (138) Minimum	Moisture Resistance
Ratio of Residual Emulsified Asphalt to Cement	Minimum 2.5:1.0	Minimum 2.5:1.0	Prevent Rigid Behavior

FDR Tipo 1 (<8% pass #200)
FDR Tipo 2 (≥8% pass #200)

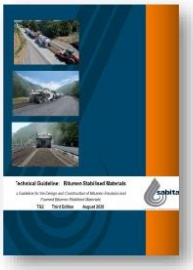
ITSdry ≥ 276kPa (Tipo 1)
ITSwet ≥ 172kPa

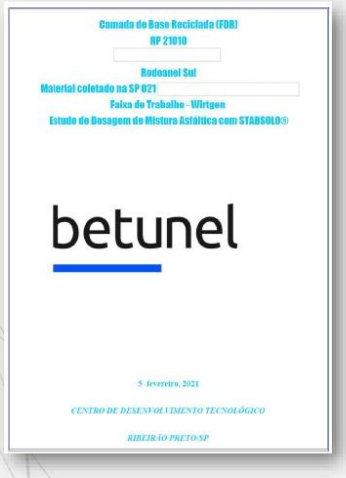


Class	RA (%)	ITS (kPa)[1]		Triaxial		
		ITS_{DRY}	ITS_{WET}	Cohesion (kPa)	Friction Angle (°)	Retained cohesion (%)
BSM 1	< 50%	225	125	250	40	75
	50 – 100%	225	125	265	38	75
BSM 2	< 50%	175	100	200[2]	38	65
	50 – 100%	175	100	225	35	75

BSM Classe 1:
Materiais com **alta resistência ao cisalhamento**. Estes materiais são adequados para a construção da camada de base em pavimentos com uma capacidade estrutural **superior** a 3 milhões de ESALs (onde a modelagem analítica e recomendada para a concepção do pavimento).
BSM Classe 2:
Materiais com **moderada resistência ao cisalhamento**. Estes materiais são adequados para a construção da camada de base de pavimentos com capacidade estrutural **inferior** a 3 milhões de ESALs (onde os métodos empíricos são adequados para conceber o pavimento).

ITSdry ≥ 225kPa (BSM1)
ITSwet ≥ 125kPa

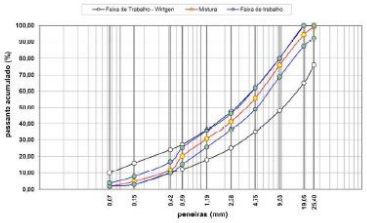






Dados:

SP021 – Rodoanel
Material fresado
Faixa granulométrica Wirtgen
Teor de ligante no RAP = 3,33%
Teor de Stabsolo = 3,00%
Resíduo de asfalto no Stabsolo = 62%
Teor de água = 2%
Teor de ligante final = 5,19% (3,33% + 62%*3%)

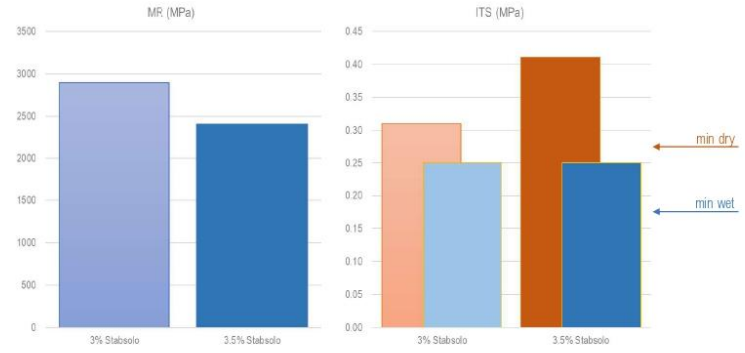


Características da Mistura Faixa de Trabalho - Wirtgen			
Ensaio	Valor obtido	Mínimo	Máximo
Teor ótimo residual	5,19%	4,90%	5,40%
Teor ótimo de STABSOLO®	3,00%	2,70%	3,30%
Densidade do ligante	1,000 g/cm³	-	-
Densidade real teórica da mistura	g/cm³	-	-
Densidade real da mistura - Rice - ABNT NBR 15619	2,480 g/cm³	-	-
Densidade aparente do corpo-de-prova - ABNT NBR 15573	2,122 g/cm³	-	-
Vazios (VV)	14,4 %	5,0%	30,0%
Relação Betume Vazios (RBV)	20,9 %	-	-
Vazios de Agregado Mineral (VAM)	18,8 %	-	-
Fluência	6,18 mm	-	-
Estabilidade Marshall (38 °C) - sem Filer	660 kgf	250	-
Estabilidade Marshall (25 °C) - sem Filer	1681 kgf	-	-
Estabilidade Marshall após DUI (25 °C) - sem Filer	553 kgf	-	-
Danos por umidade induzida - sem Filer	32,9%	70	-
Estabilidade Marshall com 1,0% Cimento Portland (38 °C)	761 kgf	250	-
Estabilidade Marshall com 1,0% Cimento Portland (25 °C)	1691 kgf	-	-
Estabilidade Marshall com 1,0% Cimento Portland após DUI (25 °C)	1279 kgf	-	-
Danos por umidade induzida com 1,0% Cimento Potland	75,6%	70	-
Estabilidade Marshall com 1,0% Cal CH-I (38 °C)	547 kgf	250	-
Estabilidade Marshall com 1,0% Cal CH-I (25 °C)	1550 kgf	-	-
Estabilidade Marshall com 1,0% Cal CH-I após DUI (25 °C)	1353 kgf	-	-
Danos por umidade induzida com 1,0% Cal CH-I	87,3%	70	-
Água de Molhagem sobre agregado seco em estufa (T)	2,00 %	-	-

Resultados alcançados com CPs Marshall; 75 golpes por face; variável de referência: maior valor de estabilidade.

PAVING EXPO 2023 MAIO 24-26

Material reciclado + 1% cal + 4% água + 3% e 3,5% STABSOLO®- Compactador giratório 30 giro





misturador automático (60 segundos); CPs 15 cm de diâmetro x 7,5 ± 0,5 cm de altura; moldados no compactador giratório com 30 giros; cura conforme ARRA por 16 horas a 48 horas à 60°C (até constância de massa) + 12 horas a 24 horas à 25°C.

PAVING EXPO 2023 MAIO 24-26

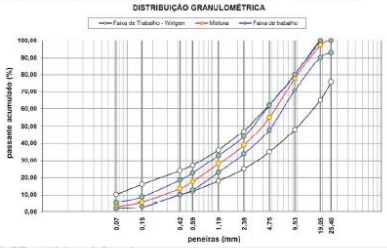

Reciclagem Profunda de CBUQ e Base (FDR)
RP 22161
BR 386 -
Faixa de Trabalho - Wirtgen
Estudo de Dosagem de Mistura Asfáltica com STABSOLO®
betunel
10 junho, 2022
CENTRO DE DESENVOLVIMENTO TECNOLÓGICO
RIBEIRÃO PRETO/SP


LAPAV
LABORATÓRIO DE PAVIMENTAÇÃO
ESCOLA DE ENGENHARIA - UFRGS
RELATÓRIO DE ENSAIO
Controle Tecnológico - Material reciclado com emulsão asfáltica
UFRGS
SETEMBRO/2022

PAVING EXPO 2023 MAIO 24 - 26

Dados:

BR386
Material fresado (82% base + 17% capa) + 1% cal CH-I
Faixa granulométrica Wirtgen
Teor de ligante no RAP = 3,74%
Teor de Stabsolo = 4,50%
Resíduo de asfalto no Stabsolo = 62%
Teor de água = 2%
Teor de ligante final = 3.43 (0.17*3.74% + 62%*4.5%)

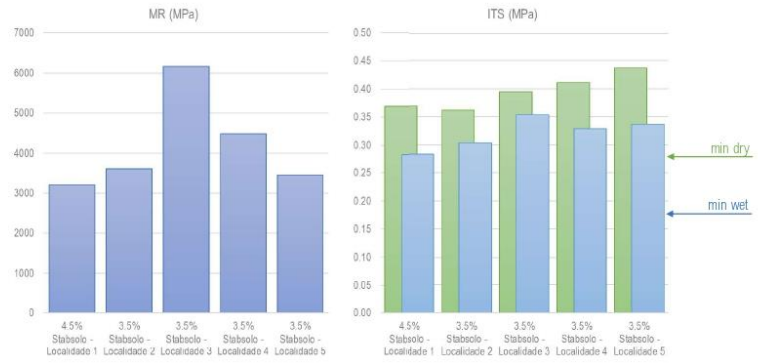


Características da Mistura Faixa de Trabalho - Wirtgen			
Ensaio	Valor obtido	Mínimo	Máximo
Teor ótimo residual	3,43%	3,32%	3,53%
Teor ótimo de STABSOLO®	4,50%	4,20%	4,80%
Densidade do ligante	1,000 g/cm³	-	-
Densidade real teórica da mistura	g/cm³	-	-
Densidade real da mistura - Rice - ABNT NBR 15619	2,337 g/cm³	-	-
Densidade aparente do corpo-de-prova - ABNT NBR 15573	2,095 g/cm³	-	-
Vazios (VV)	10,3 %	5,0%	30,0%
Relação Betume Vazios (RBV)	36,1 %	-	-
Vazios do Agregado Mineral (VAM)	16,2 %	-	-
Fluência	3,99 mm	-	-
Estabilidade Marshall (38 °C)	1786 kgf	250	-
Estabilidade Marshall (25 °C)	2244 kgf	-	-
Estabilidade Marshall após DUI (25 °C)	1905 kgf	-	-
Danos por umidade induzida	87,5%	70	-
Resistência a Tração por Compressão Diametral	0,22 MPa		-
			-
			-
			-
			-
			-
			-
			-
Água de Molhagem sobre agregado seco em estufa (*)	2,00 %	-	-

Resultados alcançados com CPs Marshall; 75 golpes por face; variável de referência: maior valor de estabilidade.

PAVING EXPO 2023 MAIO 24 - 26

82% base + 17% capa + 1% cal + 2% água + 3,5 a 4% STABSOLO®- Compactador giratório 30 giro





misturador automático (60 segundos); CPs 15 cm de diâmetro x 7,5 ± 0,5 cm de altura; moldados no compactador giratório com 30 giros; cura conforme ARRA por 16 horas a 48 horas à 60°C (até constância de massa) + 12 horas a 24 horas à 25°C.

PAVING EXPO 2023 MAIO 24-26

PROXIMAS ETAPAS

- Pista Experimental – Def. permanente (RTA)
- Especificação – Dosagem Material (RDT)
- Tese de doutorado Claudio Dias (WPN)









PAVING EXPO 2023 MAIO 24-26


Nossa Missão
Desenvolver ensino e pesquisa buscando avanço tecnológico para melhoria da infraestrutura rodoviária, mantendo suporte à sociedade com elevada qualidade de ensaios e serviços na busca por soluções a problemas práticos da engenharia rodoviária.
Política da Qualidade LAPAV
Comprometemo-nos em manter as boas práticas profissionais e o bom nível dos laboratórios, através do uso dos melhores recursos tecnológicos disponíveis; a qualidade de seus ensaios no atendimento aos seus clientes, com competência, imparcialidade e operação consistente dos laboratórios; a conformidade à norma NBR ISO/IEC 17025 e a melhoria contínua da eficácia do SGQ. Asseguramos também que todo o pessoal envolvido nas atividades de ensaio tem conhecimento dos documentos do SGQ e implementam as políticas e os procedimentos nos seus trabalhos.
Prof. Lélio Antônio Teixeira Brito, PhD
Coordenador do LAPAV - UFRGS
UFRGS
NBR ISO 17025
LAPAV
NBR ISO/IEC 17025
Nossas práticas em constante aprimoramento, resultaram em mais uma conquista.
PAVING EXPO 2023 MAIO 24 - 26


AGRADECIMENTOS
betunel
ingevity
BR PETROBRAS
ANTT
ecoRODOVIAS GRUPO
ABPv
CCR
pener
DECIV
PPGCI
UFRGS
FUNDAÇÃO LUIZ ENGLERT
PAVING EXPO 2023 MAIO 24 - 26





OBRIGADO PELA ATENÇÃO

lelio.brito@ufrgs.br

LAPAV DECIV PPGCI UFRGS FUNDAÇÃO LUIZ ENGLERT

PAVING EXPO 2023 MAIO 24-26


Camada de Reciclagem Reciclada
RP 22009
Rodovia BR 290
Coleta BR 290
DNER ES 385/99 Faixa C
Estudo de Dosagem de Mistura Asfáltica com Cyclopav 200 E - Flex

betunel

14 janeiro, 2022

CENTRO DE DESENVOLVIMENTO TECNOLÓGICO

RIBEIRÃO PRETO/SP



LAPAV

PAVING EXPO 2023 MAIO 24-26

ANEXO XIII

(Apresentação: **Experiência e Benefícios do Uso de BSM pela EcoRodovias** - no 26° Encontro do Asfalto - 30 de julho de 2024)


ecoRODOVIAS
Experiência e Benefícios do
Uso de BSM pela EcoRodovias
Douglas Mocelin e Cláudio Dias
30/07/2024

1


ecoRODOVIAS
Sumário
1. Introdução
2. Benefícios da BSM
3. Dosagem de BSM
4. Trechos Experimentais
4.1 Ecosul
4.2 Testes acelerados
4.3 Ecopistas
5. Próximos desafios

2

BITUMEN STABILIZED MATERIAL - BSM

BSM consiste em uma mistura a frio de agregados virgens juntamente com RAP, material de enchimento (fíler) e uma pequena quantidade de betume (emulsão ou espuma)



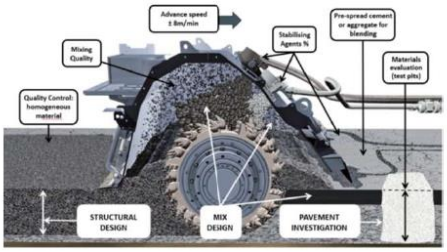


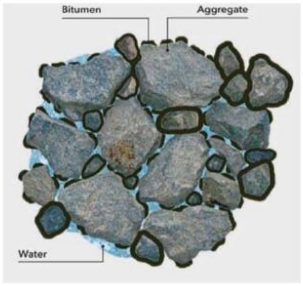
3

3

BITUMEN STABILIZED MATERIAL - BSM

A maioria dos projetos de BSM realizados nas últimas décadas são direcionados a reabilitação e restauração de pavimentos (reforço e/ou alargamento) onde o material do local do reparo é reciclado





4

4

BENEFÍCIOS DA BSM

- Aumento significativo da coesão comparado a materiais granulares não tratados, sem diminuição do ângulo de atrito
- Rigidez e resistência a flexão dado pelo natureza viscoelástica da emulsão/espuma de asfalto
- Rigidez dependente do estado de tensões – material não sujeito à fadiga
- Maior resistência à umidade e durabilidade, causado pela dispersão do betume cobrindo e formando aglomerados de partículas finas
- Possibilidade de rápida abertura ao tráfego – aumento significativo da coesão durante a compactação
- Mistura a frio – redução de emissões
- Alto reaproveitamento de material fresado – possibilidade de teor acima de 50%

5

5

DOSAGEM DE BSM

- SABITA TG2 – Technical Guideline: Bitumen Stabilised Materials
- ARRA CR 201 – EUA - Reciclagem a frio com emulsão
- ARRA FDR 201 – Full Depth Reclamation (FDR) Using Emulsified Asphalt Stabilizing Agent
- Wirtgen – Technical Guideline: Bitumen Stabilised Materials
- DNIT 166/2013 – ES - Reciclagem de pavimento a frio "in situ" com adição de espuma de asfalto

6

6

DOSAGEM DE BSM

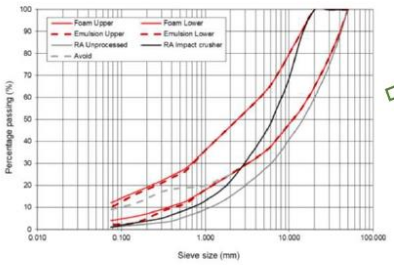
Variação de métodos encontrados na literatura

Compactação:	Parâmetros de dosagem:	Tamanho dos CP's	Cura:	Ensaios Adicionais:
- **Vibratório** - Giratório - Giratório Locking Point - Marshall	- **ITS seco e úmido** - Estabilidade - Fluência	- **ø150 x 95 mm** - ø150 x 75 mm - ø100 x 63,5±1,3mm	- **72h em estufa a 40°C +24h a 25°C;** - 16 a 48h em estufa a 60° + 12 a 24h a 25°C.	- DUI - DP - RT - Triaxial MR - **Triaxial Monotônico**

7

7

DOSAGEM DE BSM



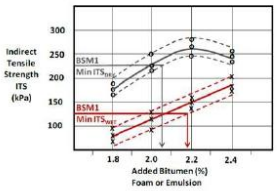
- Granulometria dependente do processamento do RAP
- Sem limites para porcentagem de RAP

- Teor de betume em função do teor de RAP e da porcentagem passando a peneira #200

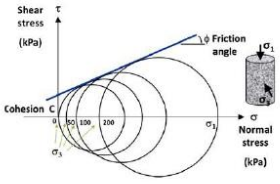
Fraction Passing 0.075 mm Sieve (%)	Bitumen Addition (% by mass of dry aggregate) Fraction Passing 4.75 mm Sieve		Typical Material Types
	< 50%	>50%	
< 4	2.0	2.0	Recycled asphalt (RA)
4 – 7	2.2	2.4	Recycled asphalt Graded crushed stone
7 – 10	2.4	2.8	Natural gravel Blends
> 10	2.6	3.0	Gravels Sands

8

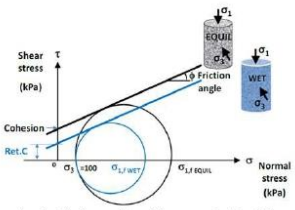
DOSAGEM DE BSM



Determinação do teor de ligante



Resultados do triaxial monotônico



Avaliação da coesão retida no ensaio triaxial

Class	RA (%)	ITS (kPa)[1]		Triaxial		
		ITS_{DRY}	ITS_{WET}	Cohesion (kPa)	Friction Angle (°)	Retained Cohesion (%)
BSM 1	< 50%	225	125	250	40	75
	50 – 100%	225	125	265	38	75
BSM 2	< 50%	175	100	200[2]	38	65
	50 – 100%	175	100	225	35	75

9

DOSAGEM DE BSM – RDT ECORODOVIAS



Compactador Vibratório
23J e molde tripartido



Corpo de prova 1%
de cimento

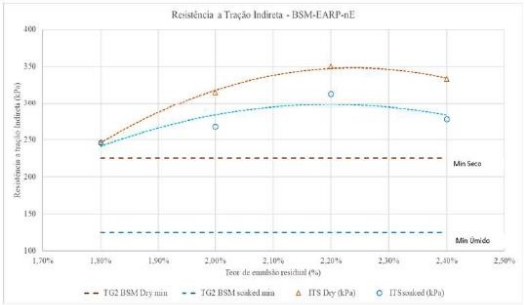


Rompimento
ITS

10

DOSAGEM DE BSM – RDT ECORODOVIAS

- 4 teores de emulsão
- Teor de filler ativo fixo
- Limites inferiores de ITS
- Cura 72h a 40°C



11

DOSAGEM DE BSM – RDT ECORODOVIAS



CP 150 x 300mm



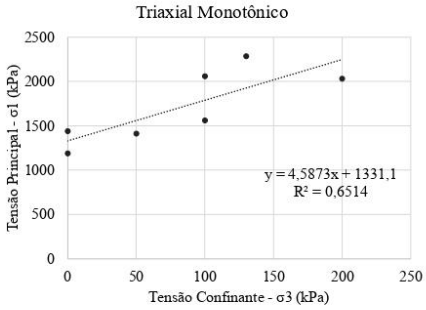
Triaxial Monotônico

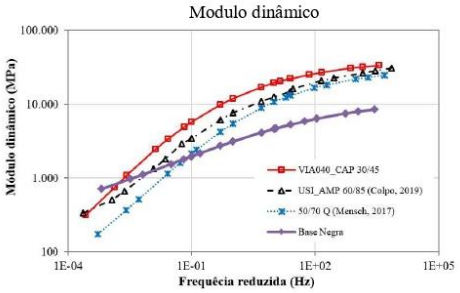


Módulo Dinâmico

12

DOSAGEM DE BSM – RDT ECORODOVIAS



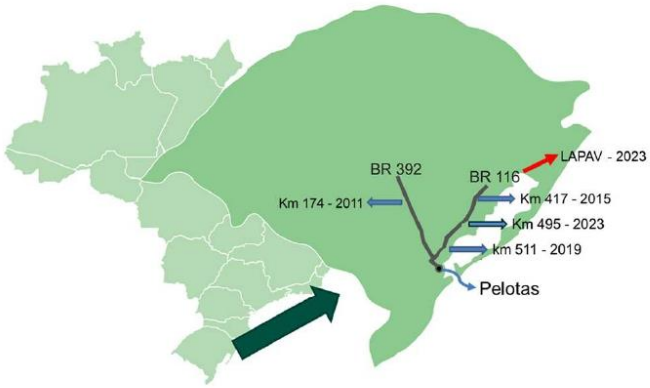


Coesão: 310,74 kPa
Ângulo de atrito: 39,94°
Coesão retida: 76%

13

SEÇÕES EXPERIMENTAIS

Ecosul

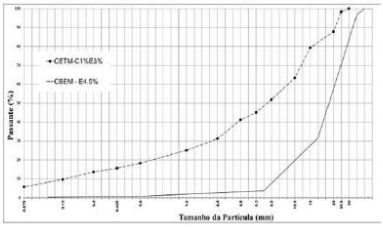


14

SEÇÕES EXPERIMENTAIS

Ecosul

Cold Bituminous Emulsion Mix CBEM (2011 e 2015)	DNER ES-P-106/80 - DNIT ET-DE-P00/026– DER-SP Asphalt Treated Permeable Base (ATPB) → Caltrans
Cement Emulsion Treated Mix CETM (2019)	Technical Guideline TG2 Agregado + RAP + Emulsão + Cimento



15

SEÇÕES EXPERIMENTAIS

Ecosul – CBEM - 2011






Layer	Thickness (mm)
New asphalt concrete	40
CBEM	100
Old asphalt concrete	120
Gravel base	400
Subgrade	-

16

SEÇÕES EXPERIMENTAIS

Ecosul – CBEM - 2015






Layer	Thickness (mm)
New asphalt concrete	60
CBEM	120
Old asphalt concrete	300
Soil base	400
Subgrade	-

17

SEÇÕES EXPERIMENTAIS

Ecosul – CETM - 2019





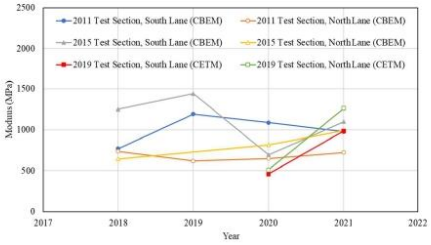

Layer	Thickness (mm)
New asphalt concrete	60
CBEM	120
Old asphalt concrete	300
Soil base	400
Subgrade	-

18

SEÇÕES EXPERIMENTAIS

Ecosul

Retroanálise de FWD



Deformação Permanente

Test section	Type of Mix	Rutting (mm) 2018		Rutting (mm) 2019		Rutting (mm) 2020		Rutting (mm) 2021	
		% > 10 mm	Average	% > 10mm	Average	% > 10 mm	Average	% > 10mm	Average
BR-392 (2011)	CBEM	0%	4	0%	4	0%	4	7%	7
BR-116 (2015)	CBEM	0%	3	0%	3	0%	3	0%	5
BR-116 (2019)	CETM	-	-	-	-	0%	0.1	0%	2

19

SEÇÕES EXPERIMENTAIS

Ecosul

Previsão de vida útil – modelo Stelenbosch

Highway	Location (km)	σ_1 (kPa)	σ_3 (kPa)	$\sigma_{1,f}$ (kPa)	DSR	A	RetC (%)	P_{MDD} (%)	Predicted number of ESALs
BR-392 (2011)	174.3-175.0	480	183	1431	0.238	1.71113	75	100	6.43E+07
BR-116 (2015)	417.4-418.0	174	42	980	0.283	1.71113	75	100	7.53E+06
BR-116 (2019)	506.0-507.0	447	105	1338	0.277	1.71113	82	100	1.01E+08

20

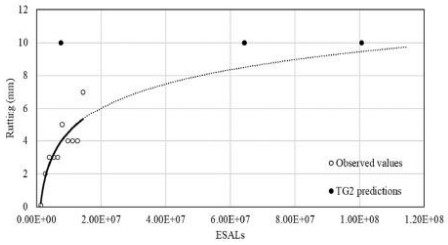
SEÇÕES EXPERIMENTAIS

Ecosul

Desempenho Previsto versus Observado

Rutting (mm)=2.1322*ln(ESALs)-29.828

$R^2 = 0.79$



21

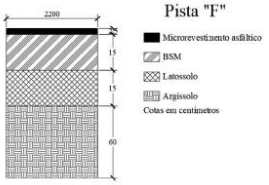
SEÇÕES EXPERIMENTAIS

Área de Testes Acelerados – LAPAV-UFRGS/Petrobras/Ecosul









22

SEÇÕES EXPERIMENTAIS

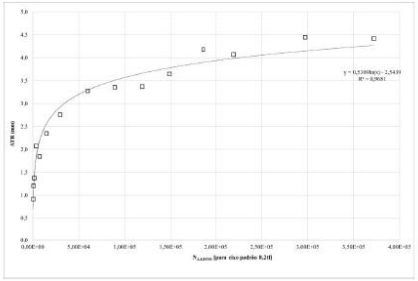
Área de Testes Acelerados – LAPAV-UFRGS/Petrobras/Ecosul

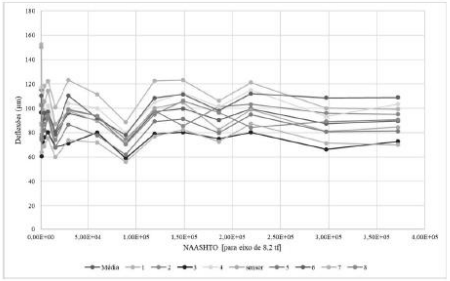


23

SEÇÕES EXPERIMENTAIS

Área de Testes Acelerados – LAPAV-UFRGS/Petrobras/Ecosul





24

SEÇÕES EXPERIMENTAIS

Ecopistas

Reparo Profundo
Trechos 2012







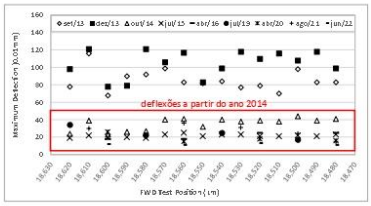
25

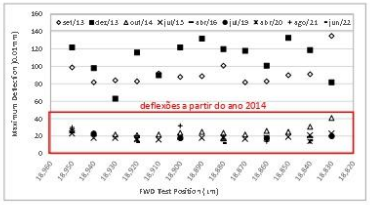
SEÇÕES EXPERIMENTAIS

Ecopistas

Reparo Profundo
Trechos 2012

Evolução das Deflexões





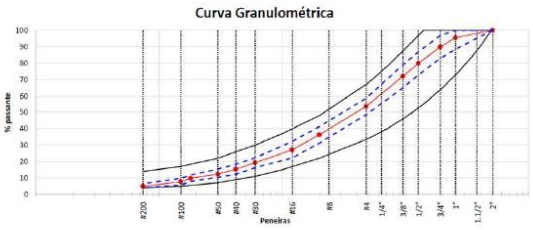
*Intervenções apenas superficias em 2020/2021 - sem necessidade de fresagem

26

SEÇÕES EXPERIMENTAIS

Ecopistas

Reparo Profundo
Trechos 2024



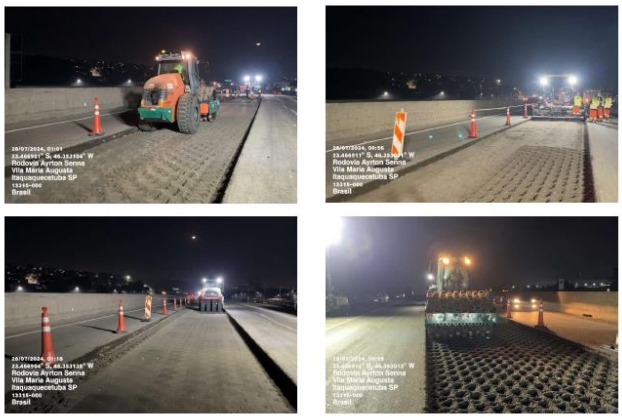
Parâmetro	Valor Definido
Teor de Asfalto indicado (%)	2,3
Teor de Filler Ativo (Cal Hidratada) indicado (%)	1,0
Densidade Máxima Aparente Seca (kg/m³)	2.050
Teor de Umidade Ótima (%)	5,5
Teor de Água para Espumação (%)	2,2
Resistência a Tração por Compressão Simples Seco (KPa)	230
Resistência a Tração por Compressão Simples Saturado (KPa)	127

27

SEÇÕES EXPERIMENTAIS

Ecopistas

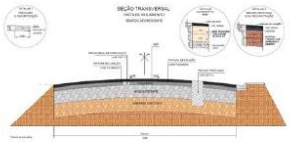
Reparo Profundo
Trechos 2024



28

PRÓXIMOS DESAFIOS...

- BSM com espuma – Ecopistas
  - Dosagem concluída
  - Execução em andamento



- Reciclagem com BSM *in-situ* com emulsão - Ecovias do Cerrado
  - Fase final de contratação

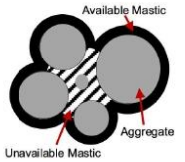


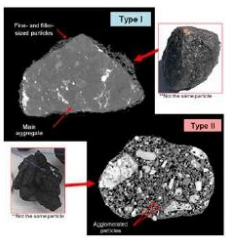


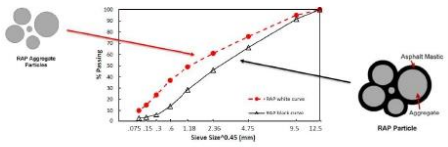
29

SOBRE O USO DE RAP EM MISTURAS ASFÁLTICAS...

- Dosagem racional de misturas asfálticas com RAP - AAMD
  - Considerando impactos da disponibilidade parcial dos ligantes do RAP
  - Efeito das aglomerações de RAP no esqueleto pétreo







Encontro de Asfalto - 13/08

Fontes das imagens:
Mocelin, Pape, Castorena, Aragão

30

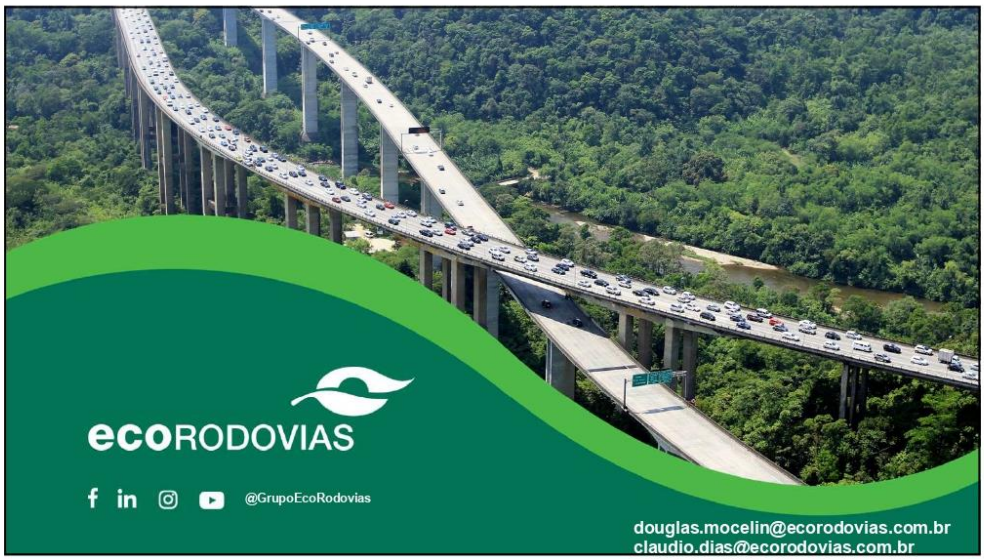
AGRADECIMENTOS

UFRGS
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

LAPAV

ANTT
AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTES TERRESTRES

31



32

ANEXO XIV

(Apresentação: **ESTUDO DE COMPÓSITOS DE CIMENTO, EMULSÃO COM FRESADO ASFÁLTICO E AGREGADOS VIRGENS PARA BASES DE ELEVADO DESEMPENHO,** XIV Workshop RDT - Recursos De Desenvolvimento Tecnológico, Brasília-DF 21 de outubro de 2024)



LAPAV
LABORATÓRIO DE PAVIMENTAÇÃO
ESCOLA DE ENGENHARIA - UFRGS

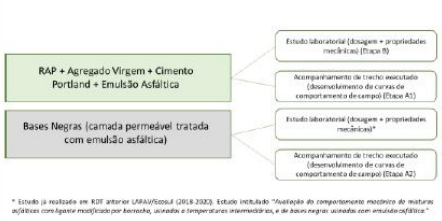
ecoSUL
ecoRODOVIAS
ANTT

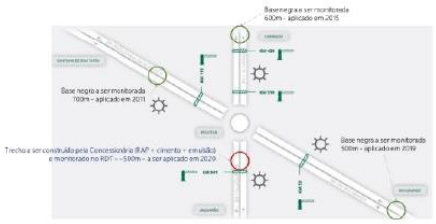
ESTUDO DE COMPÓSITOS DE CIMENTO, EMULSÃO COM FRESADO ASFÁLTICO E AGREGADOS VIRGENS PARA BASES DE ELEVADO DESEMPENHO



1

Objetivo





O objetivo da pesquisa é avaliar o comportamento de misturas com fresado (RAP), agregados virgens, emulsão e cimento, constituindo uma mistura tipo BSM (*Bitumen Stabilized Material*) determinando propriedades mecânicas em laboratório e campo com a finalidade de se obter pavimentos de melhorado desempenho e maior sustentabilidade.

2

2

1

Bitumen Stabilized Material (BSM)

BSM consiste em uma mistura de RAP + Agregados virgens + material filler + emulsão asfáltica.

A técnica é utilizada para reabilitação de pavimentos através da reciclagem a frio *in situ* ou em planta.



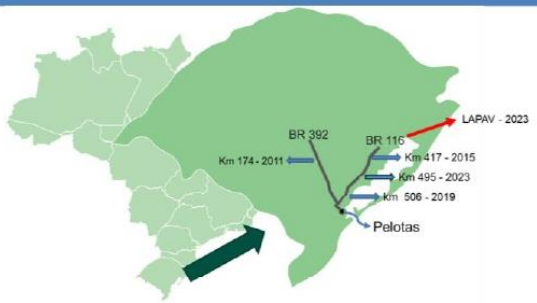





3

3

Trechos em monitoramento



Monitoramento trechos experimentais

Construção trecho BR 116/RS
KM 495 – janeiro de 2023





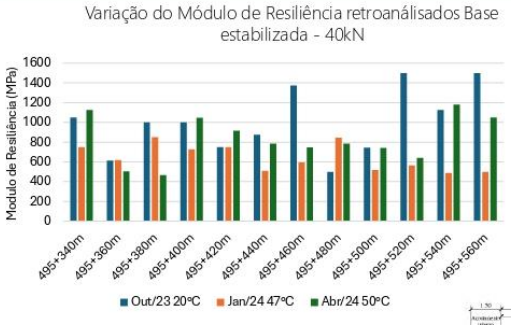


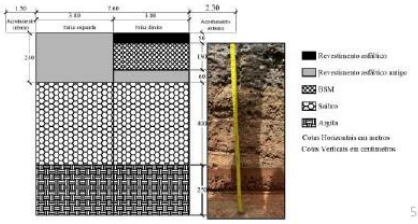




4

Ensaios de acompanhamento





5

5

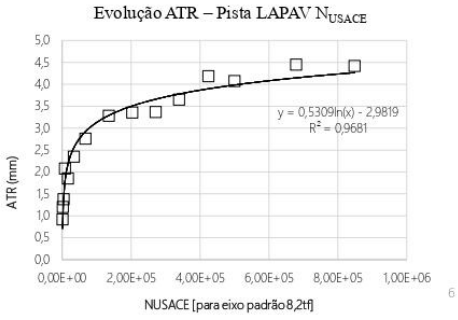
Construção e acompanhamento Pista Experimental - LAPAV











6

6

Ensaios de laboratório

Os ensaios em laboratório visam realizar a dosagem e determinação do desempenho do material. Os procecimentos utilizados no trabalho seguiram o TG2 – *Technical Guideline: Bitumen Stabilised Materials* da Republica da Africa do Sul.



Compactador Vibratório 23J e molde tripartido



Rompimento ITS



Triaxial Monotônico

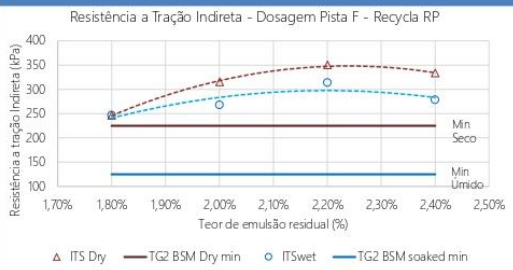


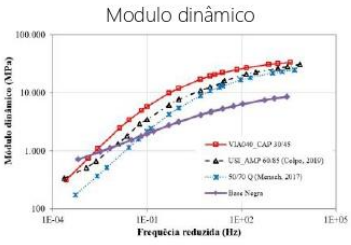
Módulo Dinâmico

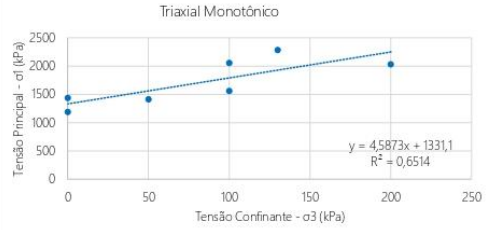
7

7

Ensaios de laboratório







8

8

4


PPGCI
DECIV
ecoSUL
ecoRODOVIAS
ANTT
www.ufrgs.br/lapav
Av. Bento Gonçalves, 9500. Prédio 43.816.
Bairro Agronomia. CEP 91501-970.
Porto Alegre/RS. Brasil
Fone: +55 51 3308-7049
e-mail: lapav@ufrgs.br
UFRGS
90 ANOS DE UNIVERSIDADE
129 ANOS COM A SOCIEDADE
90 ANOS
1934 • 2024
LAPAV

9

5

ANEXO XV

(Apresentação: "**Avaliação de BSM como Base de Alto Desempenho: Resultados de Campo e Laboratório no LAPAV/UFRGS"** 3º Simpósio de Reciclagem de Misturas Asfálticas – SIREMA – São Carlos/SP - 27 de novembro de 2024)

Avaliação de BSM como Base de Alto Desempenho: Resultados de Campo e Laboratório no LAPAV/UFRGS

Lélio Brito
LAPAV/UFRGS

1

Histórico de estudos com BSM



2

Base negra – Macadame Betuminoso

Boletim Técnico B.T.5.2 – PRÉ-MISTURADO TIPO MACADAME, Especificação de Serviço DNER – ES – P 106/80.





Características da mistura asfáltica morna com ligante ECOFLEX B 3G

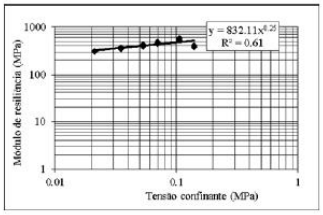
teor de asfalto (%)	densidade aparente	Vv (%)	Estabilidade	Fluência
4.5	1.810	25.5	435	11

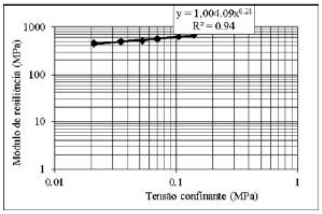
Densidade máx medida
Ensaio Rice

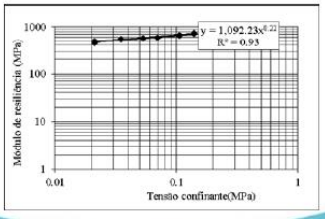
2.429

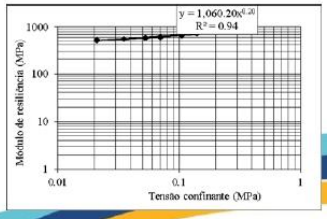
3

Base negra – Macadame Betuminoso









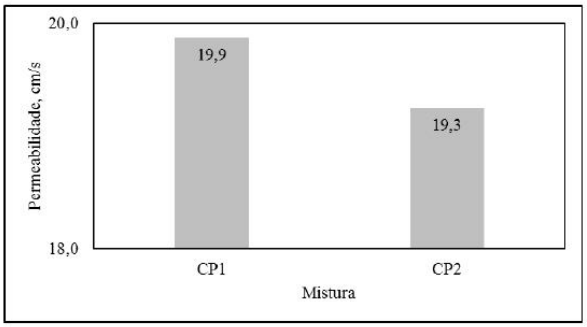
Ensaios
Triaxiais Resilientes
[300-800MPa]



4

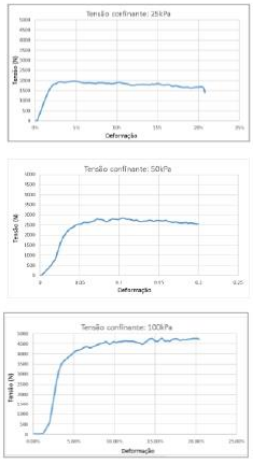
Base negra – Macadame Betuminoso

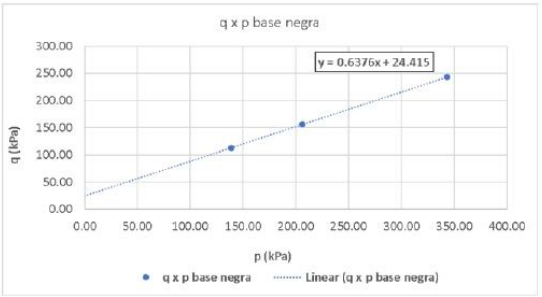




5

Base negra – Macadame Betuminoso



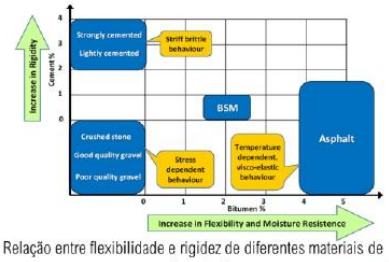


C = 36,34kPa
Φ = 47,80 graus

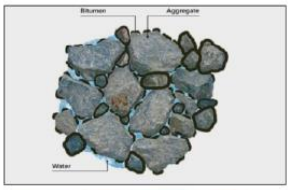
6

Mudando a direção para o BSM

A amostragem e o projeto de mistura para FDR são diferentes do que para misturas asfálticas aquecidas (HMA e WMA). Com HMA e WMA, ajustes podem ser feitos para alcançar as propriedades desejadas (VV, VAM, etc); com FDR, porém, os ajustes não são rápidos devido à natureza do processo construtivo. Portanto, é importante compreender a variabilidade da estrada e projetar adequadamente antes da construção.



Relação entre flexibilidade e rigidez de diferentes materiais de pavimentação



Conceito de "pontos soldados" por asfalto entre partículas de agregados

7

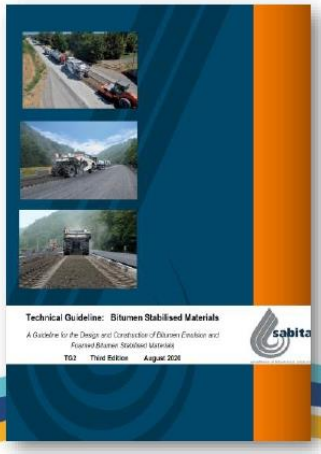
Mudando a direção para o BSM



Recommended
Mix Design Guidelines
For
Full Depth Reclamation (FDR)
Using Emulsified Asphalt Stabilizing Agent
FDR201A

ARRA

NOTICE



Technical Guideline: Bitumen Stabilised Materials

8

Normativas afins

Identificação			Dosagem					Desempenho				
Norma	Ano	País	Tipo	Molde	Compactação	Cura	Limites	Tipo	Molde	Compactação	Cura	Limites
TG2	2020	África do Sul	ITS	150x95	Vibratório	Padrão 72 horas em estufa a 40°C : - Seca: 24 horas a 25°C - Úmida : 24 horas a 25°C submerso	- ITS DRY (kPa) > 225 - ITS Wet (kPa) > 125	Triaxial monotônico	150x300	Vibratório	Padrão : - após a moldagem permoita dentro do molde - desmoldar e manter 8 horas em estufa a 40°C - ensaios CPs em estufa 40°C por 48 horas - remover de estufa, mantendo os CPs a 25°C, trocar o saco por sacos secos e realizar o ensaio após 24 horas - 2 CPs devem ser submersos por 24 horas, correspondente a cura úmida	Ângulo de atrito 40° e Coesão 75%
ARRA CR2014	2016	EUA	ITS ou Estabilidade Marshall	Marshall : 100mm x 63,5±2,5 mm - ITS : 150 x 95mm de altura	- Marshall : 75 golpes por face ou ou com 30 rotações usando um compactador giratório Superpave - ITS: Giratório Superpave	60°C até a constância de massa (mínimo 16 horas e não mais que 48 horas) +-24 horas 25°C	- ITS 310kPa - Estabilidade marshall 3560N	Dano por umidade induzida	- ITS : 150x 95mm de altura	Giratório	60°C até a constância de massa (mínimo 16 horas e não mais que 48 horas) +-24 horas 25°C	Relação aos limites de ITS
ARRA FDR2014	2018	EUA	ITS	150x 75 ± 5 mm	30 giros Superpave	60°C até a constância de massa (mínimo 16 horas e não mais que 48 horas) +-24 horas 25°C - para cura úmida : Vácuo e após submersas por 24 horas	- 276 kPa seco - 172 kPa curado	Dois específicos, como o teor de asfalto e emulsionado mais alto ou mais alto e mais baixo, devem ser produtos da AR teste de gravidade específica máxima	-	-	-	Relação aos limites

Normativas afins

Wirtgen	2012	Alemanha	ITS	Amostras com 100 mm ± 130 mm de Diâmetro ; ver 150x95mm	Ser 100x63,5 mas ball ser 130 x 95 modificado	72 horas a 40°C ± 24 horas a 25°C Saturação em vácuo ITS WET - ITS resultados após imersão em água por 24 horas a 25°C e após condicionado ITS 20°C	- ITS dry > 225 kPa - ITS wet > 125 kPa - 100 kPa - ITS mpa (40°C) 0,4 kPa	Triaxial monotônico	Triaxial monotônico	Não especifica	Não especifica	Coesão > 250 kPa e ângulo > 40°
DNIT 419/2018 - ME	1994	Brasil	Estabilidade Marshall	1200g com altura 63,5 mm ± 1,5 mm e Diâmetro de 100mm	Seguir as mas ball 3.10 a 75 de cada lado do corpo-de-prova	- estufa a 60C por 24 horas em moldes - 2 horas temperatura ambiente para desmoldar - 2 horas a 40°C antes do ensaio de estabilidade Marshall	Variável de acordo com diferentes normas. DNIT 152/2010 - ES - Fazer a Lagem de 3 vazios 3 a 5% - Estabilidade, mínimo 250 kgf (75 golpes) 1361 kgf (50 golpes) - Fluência, mm 2,0 - 4,5 1361 kgf (50 golpes) - Fluência, mm 2,0 - 4,5	-	-	-	-	-
DNIT 152/2010 - ES	2010	Brasil	Estabilidade Marshall	1200g com altura 63,5 mm ± 1,5 mm e	Seguir as mas ball 3.10 a 75 de cada lado do corpo-de-prova	-	- Fazer a Lagem de 3 vazios 3 a 5% - Estabilidade, mínimo 250 kgf (75 golpes) - Fluência, mm 2,0 - 4,5	-	-	-	-	-
DNIT 169/2015 - ES	2015	Brasil	ensaio à tração indireta por compressão diametral sem e saturado	altura 63,5 mm ± 1,5 mm e Diâmetro de 100mm	A energia de compactação deverá ser o mesmo adotado no ensaio de Ficam Modificado com corpo-de-prova de 63,5 mm e sem prévia aparelhagem mistura	72 horas de cura em estufa a 40 °C.	A resistência à tração mínima de 0,25 MPa para a mistura submetida à tração indireta saturada, e de 0,15 MPa para a mistura submetida à tração indireta saturada, a 25°C.	Dois determinações de estabilidade Marshall, em corpos de prova moldados com a técnica DNIT 152/2010 - ME para cada Tipo de mistura avaliada	-	-	-	-

Mistura betuminosa a frio, com emulsão asfáltica - ensaio Marshall

Pavimentação asfáltica – Pré- misturado a frio com emulsão catiônica convencional

Pavimentação - Reciclagem de pavimento a frio "in situ" com adição de espuma de asfalto

Dosagem de misturas recicladas com emulsão

Wirtgen (2012)

- ✓ ITSseca;
- ✓ ITSseca + imersão;
- ✓ ITSR.



Austroads (2019)

Módulo à tração indireta:

- ✓ M_i (inicial);
- ✓ M_d (seca);
- ✓ M_w (imersão);
- ✓ M_w/M_d (imersão/seca).



ARRA (2018)

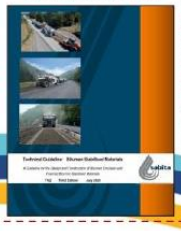
- ✓ ITSseca;
- ✓ ITSseca + imersão;
- ✓ *Razão: ligante/cimento.

*Prevenir comportamento rígido!



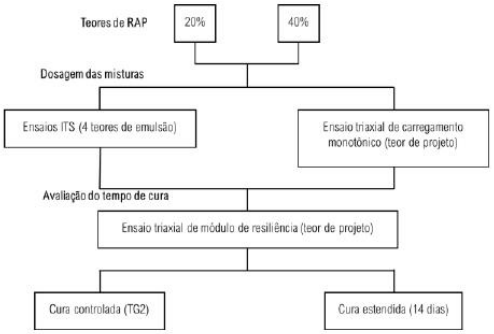
SABITA (2020) – TG2

- ✓ ITSseca;
- ✓ ITSseca + imersão;
- ✓ Cisalhamento (c e ϕ).



11

Dissertação Martell, 2022





Brita Graduada Simples (BGS):

- ✓ Origem granítica;
- ✓ Usina 4 silos;
- ✓ Eldorado do Sul/RS.



Cimento:

- ✓ Tipo CP-IV 32;
- ✓ Resistência intermediária: 32 MPa;
- ✓ Até 50% de cinza volante.



RAP:

- ✓ BR-290/RS (km 134);
- ✓ Estocado sem proteção;
- ✓ Eldorado do Sul/RS.



Emulsão:

- ✓ Recyola RP (FDR);
- ✓ Emulsão especial;
- ✓ Realiva o ligante oxidado (CAP).

12

Dissertação Martell, 2022

Caracterização dos materiais pétreos

- BGS
  - ✓ Granulometria;
  - ✓ Compactação;
  - ✓ Equivalente de areia;
  - ✓ Abrasão "Los Angeles".
- RAP
  - ✓ Granulometria.

Caracterização das misturas (RAP + BGS + cimento + emulsão)

- ✓ Granulometria;
- ✓ Compactação.

Compactação das misturas

- ✓ $g_{dmáx.}$;
- ✓ *Optimum fluid content* (OFC).

Caracterização da emulsão

- ✓ Viscosidade Saybolt Furol;
- ✓ Sedimentação;
- ✓ Peneiração;
- ✓ Carga de partícula;
- ✓ Teor do resíduo seco;
- ✓ pH.

Fluído (50% água/50% emulsão).



Mistura com 10% de fluído.



13

Dissertação Martell, 2022

Condições de cura:  72h à 40°C (pesagem) →  + 4h à 40°C (pesagem) → + 24h à 25°C (bancada) → Cura seca: rompidos! / Cura seca + imersão

Rompidos! ← + 24h à 25°C (pesagem) ← 

Compactação vibratória → 2 ou 3 camadas / Tempo de vibração variável (máx. 120s) → Martelo demolidor Bosch GSH500 (1100W/7,5J) → CPs 150x95mm (diâm. x altura)

14

Dissertação Martell, 2022

Dosagem das misturas (TG2)

Resistência à tração indireta (ITS)

Pórtico e martelo demolidor.



CPs após a cura seca.



CPs em imersão.



Prensa ITS.



Molde tripartido.



15

Dissertação Martell, 2022

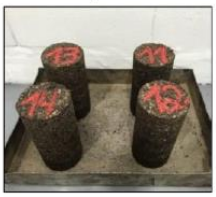
Dosagem das misturas (TG2)

Resistência ao cisalhamento (c e f)

Prensa MTS.



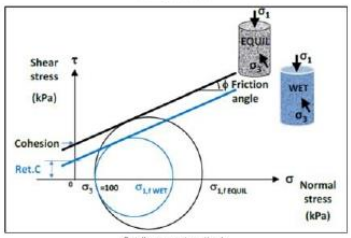
CPs após a cura seca.



CPs em imersão.



Avaliação da RotC.



Detalhe s_3 sendo aplicada.



16

Dissertação Martell, 2022

Extrusão do CP.



CP após a cura.



Membrana de borracha.



Ensaio em andamento.



17

Dissertação Martell, 2022

Verificação adicional da dosagem (ITS)

- ✓ Densificação inadequada na etapa inicial;

- ✓ 12 CPs por mistura;
- ✓ 24 CPs no total.

CP 150x300mm (MR) ⋙ Serrados → Terço superior (4x); Terço médio (4x); Terço inferior (4x) ⋙ → ITS *versus* profundidade; e% *versus* profundidade

- ✓ G_{mm}: DNIT 427/2020-ME;
- ✓ e%: ASTM D3203;
- ✓ CPs não foram submersos.



24h à 40°C

Serragem dos CPs.





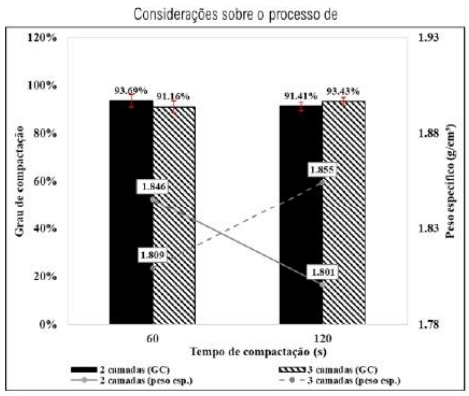
18

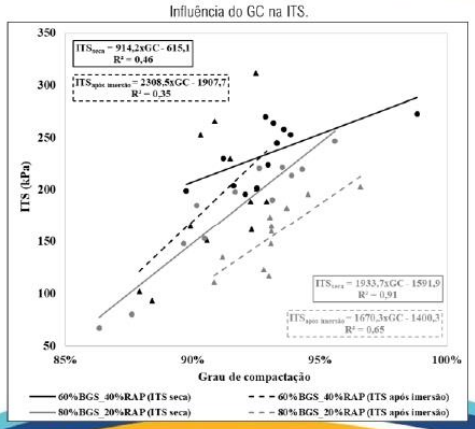
Dissertação Martell, 2022

Mistura	Parâmetros de moldagem		Teores	
	OFC	$g_{dmáx.}$	Emulsão	Água
80%BGS_20%RAP	7%	1,985 g/cm³	2,9%	4,1%
			3,1%	3,9%
			3,3%	3,7%
			3,5%	3,5%
60%BGS_40%RAP	7,4%	1,970 g/cm³	2,9%	4,5%
			3,1%	4,3%
			3,3%	4,1%
			3,5%	3,9%

19

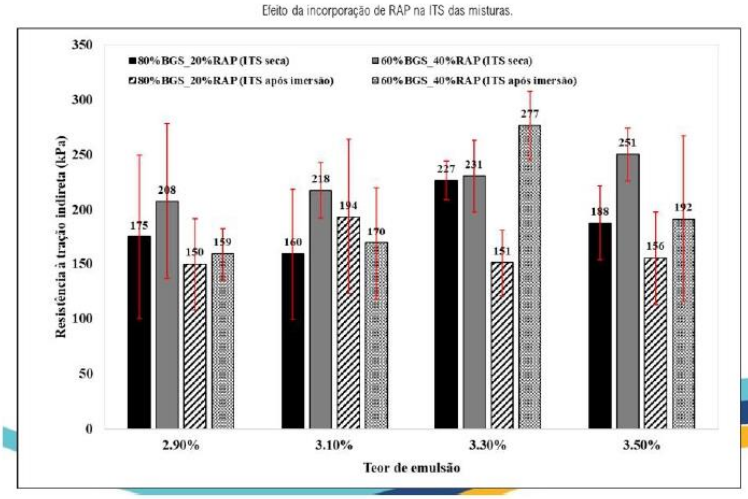
Dissertação Martell, 2022





20

Dissertação Martell, 2022



- ✓ %RAP = ↑ ITS
- ✓ Imersão = ↓ ITS
- ✓ 3,1% (imersão)
  - %RAP = ↓ ITS
  - %RAP = ↓ GC

21

Dissertação Martell, 2022

Ruptura por embarrilamento.



Possível plano de ruptura (após remoção da estufa).



Parâmetros de dosagem

- ✓ 60%BGS_40%RAP
  - ✓ ITS >= (225 kPa/125 kPa);
  - ✓ c >= 250 kPa;
  - ✓ f >= 40°;
  - ✓ RetC >= 75%.

TG2!

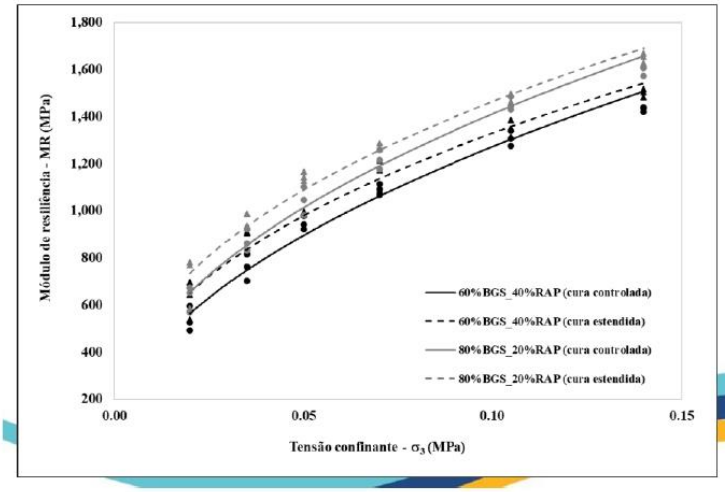
- ✓ 80%BGS_20%RAP
  - ✓ ITS >= (225 kPa/125 kPa);
  - ✓ c >= 250 kPa;
  - ✓ f >= 40°; »» 32° ✗
  - ✓ RetC >= 75%.

TG2!

22

Dissertação Martell, 2022

Avaliação do tempo de cura no MR triaxial (modelo k-s_3).

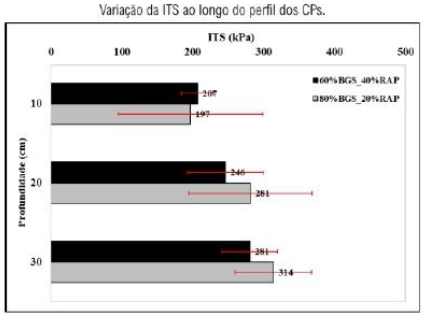


- ✓ Não linearidade (s_3)
- ✓ Comportamento granular
- ✓ %RAP = MR
- ✓ cura = MR
- ✓ %umidade = sucção

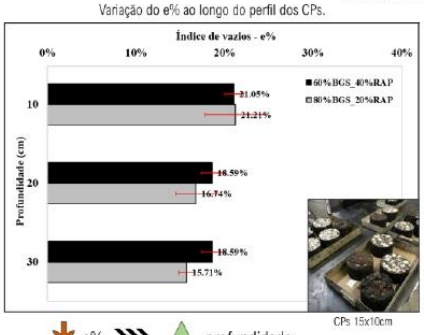
23

Dissertação Martell, 2022

Variação da ITS ao longo do perfil dos CPs.



Variação do e% ao longo do perfil dos CPs.



- ITS ⋙ profundidade
- ✓ 80%BGS_20%RA GC
- P:
- e% ⋙ profundidade
- e% ⋙ ITS

24

Dissertação Martell, 2022

PRINCIPAIS CONCLUSÕES

- Variabilidade no processo de compactação vibratória;
- Mistura 80%BGS_20%RAP alcançou maiores densidades para um mesmo tempo de vibração (granulometria e %emulsão).
- Misturas alcançaram os valores mínimos preconizados pelo TG2 (BSM1);
- Mistura 60%BGS_40%RAP obteve um melhor desempenho;
- Apenas a mistura 60%BGS_40%RAP alcançou o valor mínimo de f preconizado pelo TG2 (BSM1);
- Reciclagem do tipo FDR com emulsão pode gerar camadas com comportamento resiliente adequado;
- Mistura 80%BGS_20%RAP apresentou uma maior rigidez;
- Maiores períodos de cura possibilitaram um aumento no MR;
- Não linearidade, MR é influenciado pelo estado de tensões.

25

Pesquisa de RDT ANTT/Ecorodovias



Pesquisa RDT – ANTT/Ecosul
Suporte do IPR/DNIT
Parceria da Petrobras & Greca Asfaltos
Projeto de 2022 - 2025

26

Dissertação Martell, 2022

PRINCIPAIS CONCLUSÕES

- Variabilidade no processo de compactação vibratória;
- Mistura 80%BGS_20%RAP alcançou maiores densidades para um mesmo tempo de vibração (granulometria e %emulsão).
- Misturas alcançaram os valores mínimos preconizados pelo TG2 (BSM1);
- Mistura 60%BGS_40%RAP obteve um melhor desempenho;
- Apenas a mistura 60%BGS_40%RAP alcançou o valor mínimo de f preconizado pelo TG2 (BSM1);
- Reciclagem do tipo FDR com emulsão pode gerar camadas com comportamento resiliente adequado;
- Mistura 80%BGS_20%RAP apresentou uma maior rigidez;
- Maiores períodos de cura possibilitaram um aumento no MR;
- Não linearidade, MR é influenciado pelo estado de tensões.

25

Pesquisa de RDT ANTT/Ecorodovias



Pesquisa RDT – ANTT/Ecosul
Suporte do IPR/DNIT
Parceria da Petrobras & Greca Asfaltos
Projeto de 2022 - 2025

26

Pesquisa de RDT ANTT/Ecorodovias

Desafios

i. Dosagem da mistura
ii. Modos de falha – modelagem
iii. Dimensionamento da camada
iv. Previsão de desempenho na vida útil
v. Estimativa dos impactos no ciclo de vida (ESG)



Normativas ?

i. Procedimento de dosagem
ii. Especificação de ensaios
iii. Especificação de serviço
iv. Procedimento de dimensionamento (Parâmetros)



27

Pesquisa de RDT ANTT/Ecorodovias

Compactação: - Vibratório - Giratório - Giratório Locking Point - Marshall	Parâmetros de dosagem: - ITS seco e úmido - Estabilidade - Fluência	Tamanho dos CP's - ø150 x 95 mm - ø150 x 75 mm - ø100 x 63,5±1,3mm	Cura: - 72h em estufa a 40°C +24h a 25°C; - 16 a 48h em estufa a 60° + 12 a 24h a 25°C.	Ensaios Adicionais: - DUI - DP - RT - Triaxial MR - Triaxial Monotônico
Vibratório	ITS Seco e úmido	ø150 x 95 mm	- 72h em estufa a 40°C +24h a 25°C;	Triaxial Monotônico ø150 x 300 mm

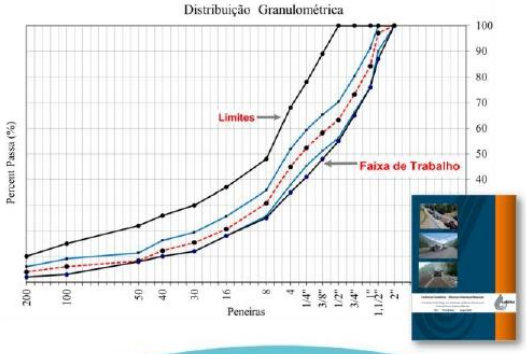
Ensaios utilizados na Literatura Ensaios utilizados no RDT

28

Pesquisa de RDT ANTT/Ecorodovias

Composição granulométrica da BSM:
- 32% de RAP
- 39% de pó de Brita
- 28% de Brita 1 ½"
- Cimento
- 2% de asfalto residual da emulsão.

- Densidade na energia modificada 2069 kg/m³;
- Teor de umidade ótimo de 7,9%;
- Equivalente de areia 71,6%.



29

Pesquisa de RDT ANTT/Ecorodovias

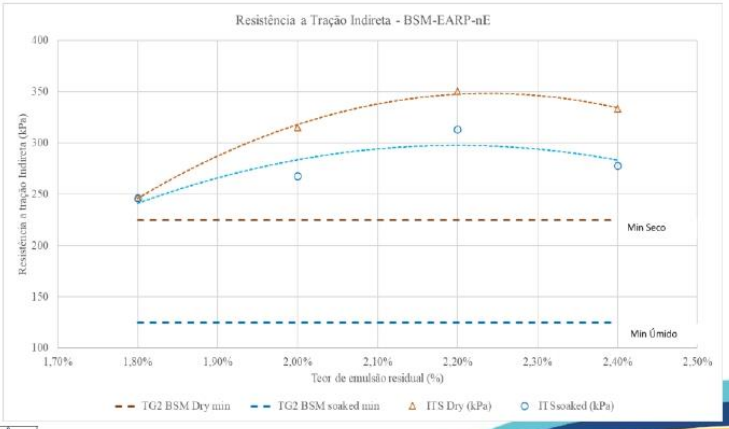

Compactador Vibratório 23J e molde tripartido


Corpo de prova 1% de cimento


Rompimento ITS

30

Pesquisa de RDT ANTT/Ecorodovias



4 teores de emulsão
Limitação 1% de cimento
Limites inferiores de ITS
Cura 72h a 40°C

31

Pesquisa de RDT ANTT/Ecorodovias



CP 150 x 300mm



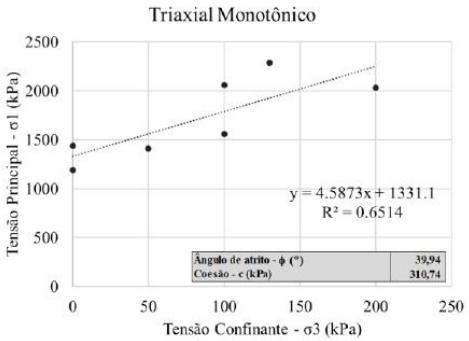
Triaxial Monotônico

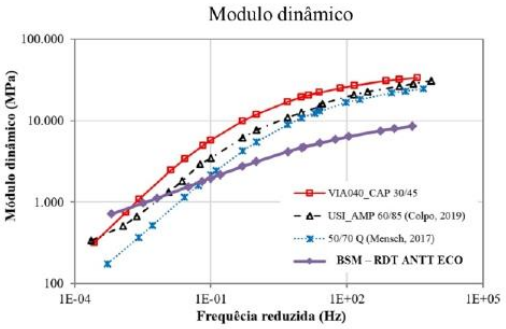


Módulo Dinâmico

32

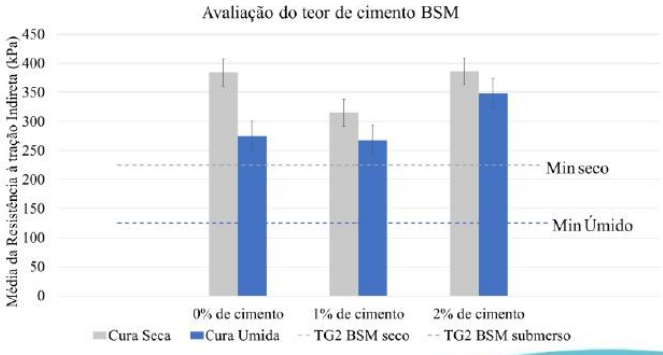
Pesquisa de RDT ANTT/Ecorodovias





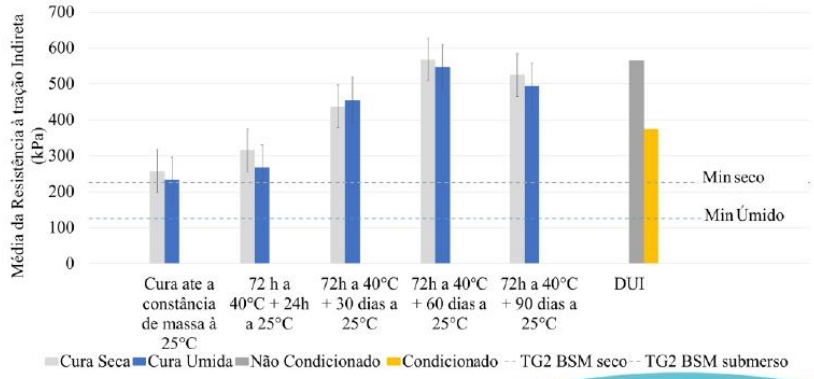
33

Pesquisa de RDT ANTT/Ecorodovias



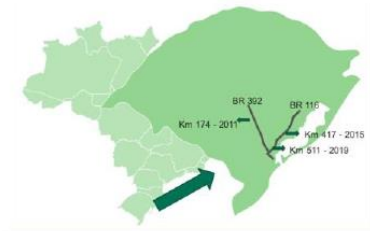
34

Pesquisa de RDT ANTT/Ecorodovias



35

Pesquisa de RDT ANTT/Ecorodovias



ANTT

ecoSUL

UFRGS
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

PETROBRAS



36

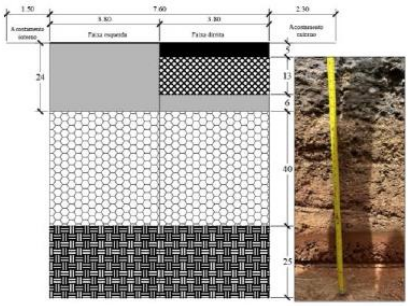
Pesquisa de RDT ANTT/Ecorodovias



Trecho correspondente ao km 495+400m ao km 495+449m
Escolhido para intervenção e poço de inspeção

37

Pesquisa de RDT ANTT/Ecorodovias







38

Pesquisa de RDT ANTT/Ecorodovias

Trechos avaliados:

- BR-392/RS km 174+300 ao km 175+000, com execução em 2011;
- BR-116/RS km 417+400 ao km 417+600, com execução em 2015;
- BR-116/RS km 506+00 ao km 507+ 000, com execução em 2019;
- BR-116/RS km 495+360 ao km 495+540, com execução em janeiro de 2023.

Levantamento:

- Junho 2023;
- Outubro 2023;
- Janeiro 2024;
- Abril 2024 ;

Níveis de Carga FWD

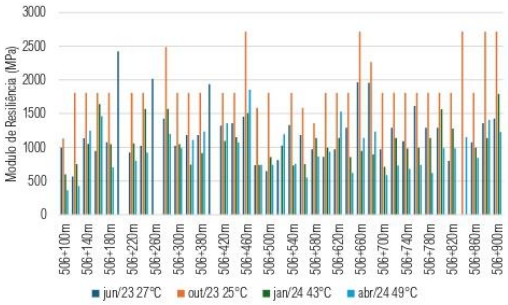
Altura	Carga Alvo (kN)	Carga Alvo (kips)	Faixa aceitável (kN)	Faixa aceitável (kips)
1	26,7	6,0	24,0 a 29,4	5,4 a 6,6
2	40,0	9,0	36,0 a 44,0	8,1 a 9,9
3	53,4	12,0	48,1 a 58,7	10,8 a 13,2
4	71,2	16,0	64,1 a 78,3	14,4 a 17,6

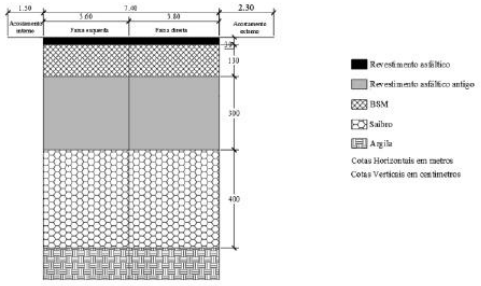


39

Pesquisa de RDT ANTT/Ecorodovias

Variação do Módulo de Resiliência retroanálisados Base estabilizada - 40kN





40

Pesquisa de RDT ANTT/Ecorodovias

PISTA F – SIMULADOR DE TRÁFEGO LAPAV/UFRGS



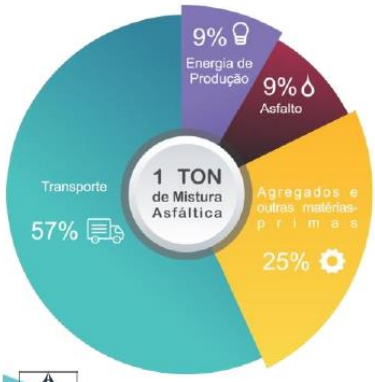




41

Pesquisa de RDT ANTT/Ecorodovias

Peso percentual médio das emissões de gases de efeito estufa na produção de concreto asfáltico



- Importância do ESG & EPDs
- Dificuldade de avaliação em função da variação de protocolos
- Protocolos de autoavaliação e, outros, com certificação
- Cuidar com as comparações diretas? LCA?



~50 kgs/ton



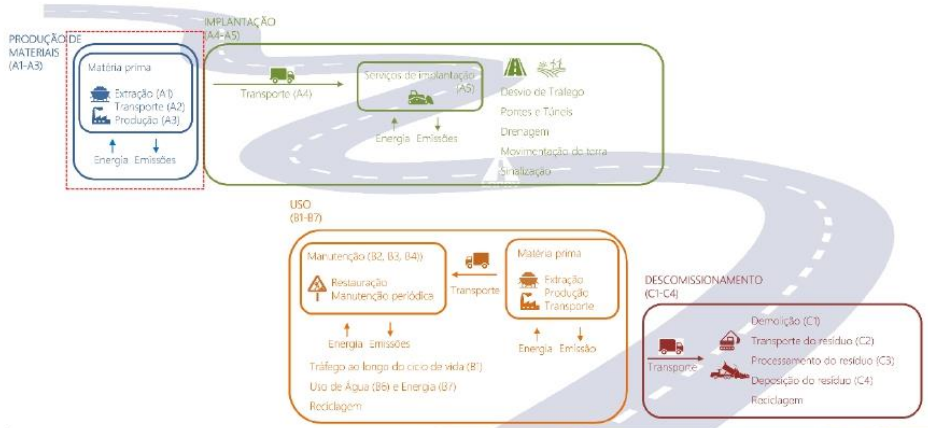
~300 kgs/ton



~2000 kgs/ton

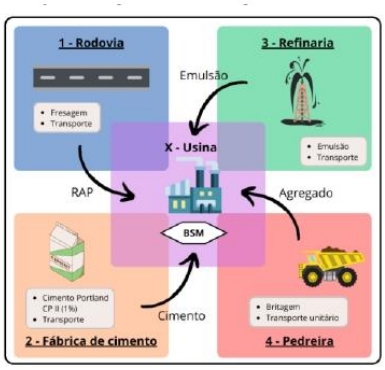
42

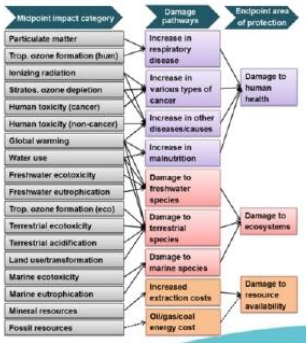
Pesquisa de RDT ANTT/Ecorodovias



43

Pesquisa de RDT ANTT/Ecorodovias





A1, A2, A3
ReCiPe
Background – EcoInvent
Foreground – Ecosul + SICRO
Análise para 100 ton

Tabela 17: Traço da BSM

Material	Quantidade (%, t)
Agregado	65,66
Fresado RAP	31,36
Cimento	0,98
Emulsão	2

44

Agradecimentos

UFRGS 90 ANOS DE UNIVERSIDADE 129 ANOS COM A SOCIEDADE
sirema
ABPv
EESC • USP
ANTT
ecoRODOVIAS
ecoSUL
BR PETROBRAS
GRECA ASFALTOS
ingevity
infraTest TESTING SYSTEMS

45



Lélio Brito
LAPAV/UFRGS
lelio.brito@ufrgs.br +55 51 98121.5555

sirema

LAPAV UFRGS 90 ANOS DE UNIVERSIDADE 129 ANOS COM A SOCIEDADE 90 ANOS

46

ANEXO XVI

(Apresentação: "**Cold Recycling in Italy: Research and Specifications for Eco-sustainable Road Pavements"** 3º Simpósio de Reciclagem de Misturas Asfálticas – SIREMA – São Carlos/SP - 27 de novembro de 2024)

Cold Recycling in Italy: Research and Specifications for Eco-sustainable Road Pavements

Andrea Grilli
Università Politecnica delle Marche (Ancona, Italia)

1

Outline

- Techniques
- Materials
- Layers
- Background
- Case studies
- Specifications
- Conclusions

2

UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE

Cold recycling techniques

Cold recycling (not, or just limited, heating of constituent materials):

- Cold Central Plant Recycling (CCPR)

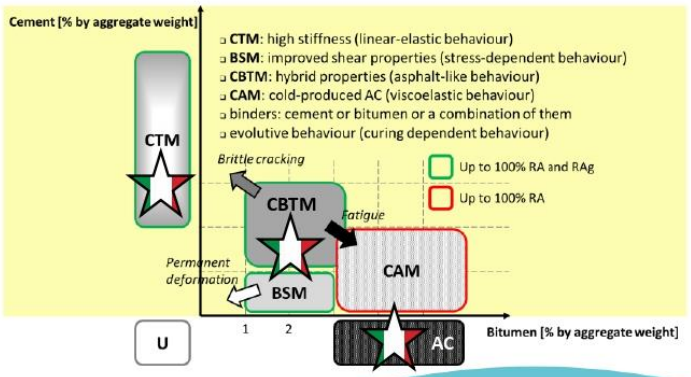


- Cold In-place Recycling (CIR): partial-depth recycling
- Full Depth Reclamation (FDR): full-depth recycling



UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE

Conceptual composition of paving mixtures

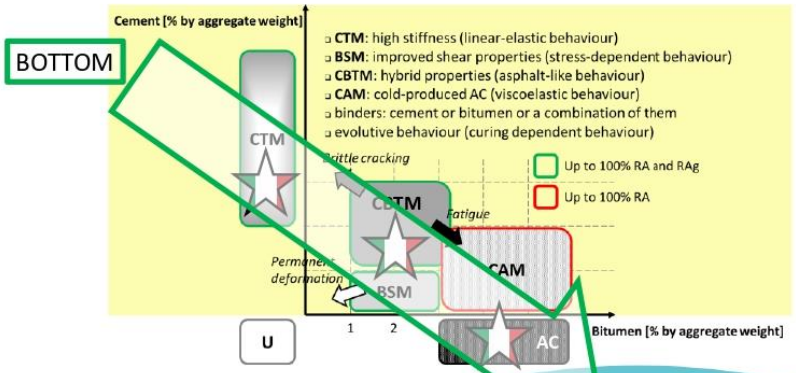


Techniques | Materials | Layers | Background | Case studies | Specifications | Conclusions

UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE

sirema

Conceptual composition of paving mixtures



Sao Carlos, 27-10-2024 Andrea Grilli 5

5

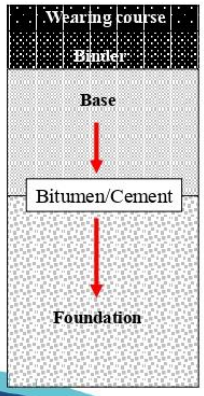
Techniques | Materials | Layers | Background | Case studies | Specifications | Conclusions

UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE

sirema

Base or binder vs. Foundation

- **Base or binder courses:**
  - Bitumen/cement > 1
  - In-plant production (stability and homogeneity)
  - Full-width laying
  - Bitumen (residual bitumen from modified emulsion): 2.5 - 3.5% (about 4.0 - 6.0% of modified emulsion)
  - Cement: 1.5 - 2.5%
  - (processed) RA: ≥ 80%
  - Mineral aggregate: ≤ 20% and Mineral filler: 2 - 4%
- **Foundation or subbase courses:**
  - In-situ production (thick layers)
  - Bitumen (foam bitumen or residual bitumen from emulsion): 1.5 - 3.0%
  - Cement and/or lime: 1.5 - 2.5%
  - RA and recycled materials: ≥ 80%
  - Mineral aggregate: ≤ 20%



Sao Carlos, 27-10-2024 Andrea Grilli 6

6

Techniques | Materials | Layers | Background | Case studies | Specifications | Conclusions

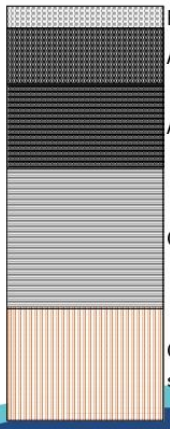
UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE

sirema

Traditional pavement <1>

- 5,000 heavy vehicle/day/lane
- 8×10^6 120kN-ESAL/year
- Service life: 20 years





Porous asphalt concrete: 4 cm

Asphalt concrete: 10 cm

Asphalt concrete: 15 cm

Cement treated materials: 25 cm

Granular materials / stabilised subgrade: variable thickness

Sao Carlos, 27-10-2024 Andrea Grilli 7

7

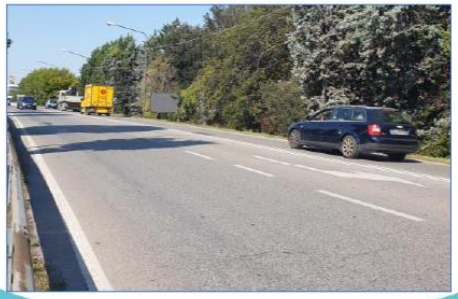
Techniques | Materials | Layers | Background | Case studies | Specifications | Conclusions

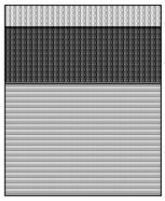
UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE

sirema

Traditional pavement <2>

- 500 heavy vehicle/day/lane
- Service life: 20 years





Asphalt concrete: 4 cm

Asphalt concrete: 7 cm

Granular materials/Cement treated materials: 20 cm

Sao Carlos, 27-10-2024 Andrea Grilli 8

8

Techniques | Materials | Layers | Background | Case studies | Specifications | Conclusions

Cold recycling annual production

UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE

- Autostrade per l'Italia: Motorway (since 2001):
  - Cold-recycled **subbase** (foam bitumen and cement): 21,000 m^3
  - Cold-recycled **base** (modified bituminous emulsion and cement): 17,400 m^3
- ANAS: National road network (from 2021 to 2024)
  - Cold-recycled **subbase and base**: 125,000 m^3
- **In rehabilitation project at least one cold recycling technique is applied**
- **Limitations** are not generally related to the recycling technique but to **design approach, investments for road rehabilitation and traffic management!**

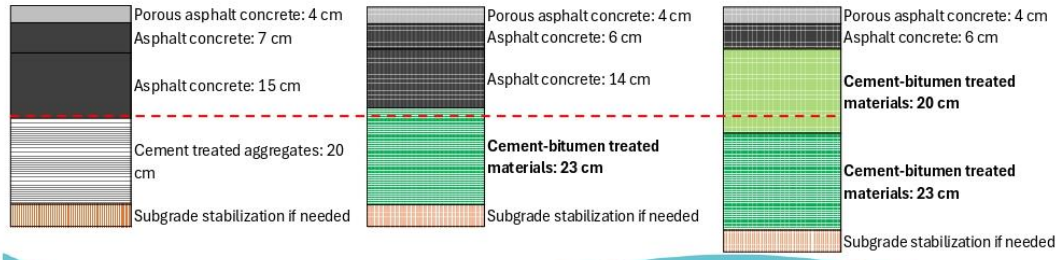
9

Techniques | Materials | Layers | Background | Case studies | Specifications | Conclusions

Typical maintenance schemes

UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE

- 5,000 heavy vehicle/day/lane
- Service life (preliminary design): 20 years



10

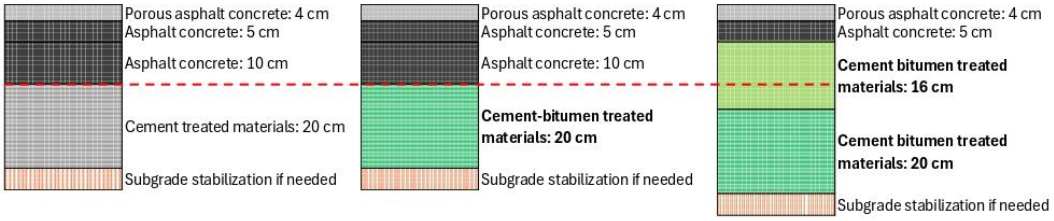
Techniques | Materials | Layers | Background | Case studies | Specifications | Conclusions

UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE

sirema

Typical maintenance schemes

- 2,200 heavy vehicle/day/lane
- Service life (preliminary design): 20 years



11

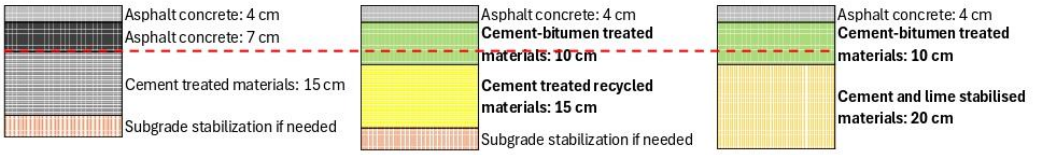
Techniques | Materials | Layers | Background | Case studies | Specifications | Conclusions

UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE

sirema

Typical maintenance schemes

- 500 heavy vehicle/day/lane
- Service life (preliminary design): 20 years



12

Techniques | Materials | Layers | Background | Case studies | Specifications | Conclusions

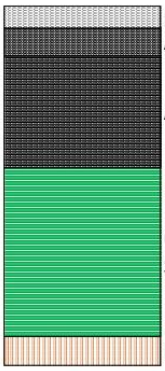
UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE

sirema

FDR: A14 motorway (2007-08)

- 40 + 40 km
- Service life: 120×10^6 80kN-ESAL
- **50% RA + 50% recycled aggregates**
- **3.0% Emulsion, 2.0% Cem II**





Porous asphalt concrete (PmB): 4 cm
Asphalt concrete (PmB): 5 cm

Asphalt concrete (PmB): 20 cm

Cement-bitumen treated materials: 30 cm

Lime stabilization

13

Techniques | Materials | Layers | Background | Case studies | Specifications | Conclusions

UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE

sirema

FDR: A14 motorway (2007-08)







14

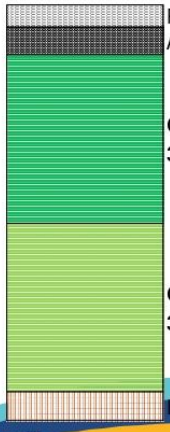
Techniques | Materials | Layers | Background | Case studies | Specifications | Conclusions

UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE

CCPR: A1 motorway (2010-11)

- 15 + 15 km
- Service life: 80×10^6 80kN-ESAL
- **85% RA (0/8 and 8/16)**, 15 % Sand
- **4.0% Modified Emulsion, 2.0% Cem II**





Porous asphalt concrete (PmB): 4 cm
Asphalt concrete: 5 cm

Cement-bitumen treated materials: 30 cm

Cement treated materials (RA 50%): 30 cm

Lime stabilization

15

Techniques | Materials | Layers | Background | Case studies | Specifications | Conclusions

UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE

CCPR: A1 motorway (2010-11)







16

Techniques | Materials | Layers | Background | Case studies | Specifications | Conclusions

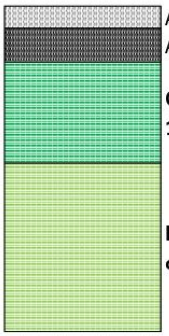
UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE

sirema

CIR: SS73 bis (2022)

- 4 + 4 km
- Service life: 15×10^6 80kN-ESAL
- **100% RA**
- **4.0% Modified Emulsion, 1.5% Cem II**





Asphalt concrete (PmB): 4 cm
Asphalt concrete (PmB): 6 cm

Cement-bitumen treated materials: 18 cm

Materials stabilised with lime and cement: 30 cm

17

Techniques | Materials | Layers | Background | Case studies | Specifications | Conclusions

UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE

sirema

CIR: SS73 bis (2022)







18

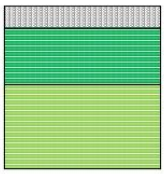
Techniques | Materials | Layers | Background | Case studies | Specifications | Conclusions

UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE

sirema

CCPR: San Marino (2020)

- Service life: 3×10^6 80kN-ESAL
- **92% RA (0/8 and 8/20)**
- 4 % Sand, **4% Mineral filler**
- **4.5% Modified Emulsion, 2.0% Cem II**



Asphalt concrete (PmB): 4 cm
Cement-bitumen treated materials: 10 cm
Recycled aggregates and RA treated with cement: 15 cm



CRAB for OERE

CEDR Conférence Européenne des Directeurs des Routes Conference of European Directors of Roads

Techniques | Materials | Layers | Background | Case studies | Specifications | Conclusions

UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE

sirema

CCPR: San Marino (2020)



Techniques | Materials | Layers | Background | Case studies | Specifications | Conclusions

UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE

Motorway specifications (2023)

- Cold in plant recycled foundation or subbase course with cement
- Cold in place recycled foundation or subbase course with cement

- Cold in place recycled foundation or subbase course with bitumen and cement
- Cold in plant recycled foundation or subbase course with bitumen and cement
- Cold in place improvement of unbound foundation courses using foamed bitumen and cement

- Cold in plant recycled subbase or base course with modified bitumen emulsion and cement

Techniques | Materials | Layers | Background | Case studies | Specifications | Conclusions

UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE

Item outline

- General description of the works
- Material properties (aggregates and binders)
- Mix design procedure (either in plant or in place)
- Construction procedure (production, laydown and compaction)
- Acceptance testing (on the as built course)

UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE

sirema

General requirements

- Emulsion or foamed bitumen (foundation/subbase)
- Foam bitumen: 70/100, ER ≥ 20; $t_{1/2}$ ≥ 25
- Emulsion: Pen. ≤ 100; stability with cement ≤ 2
- Modified emulsion (base): E_R ≥ 20 stability with cement ≤ 2
- Aggregates can be imported (no limitations)
- **Trial section: at least 3 subsections 20 m long**

In-place recycling

- Sampling every 500 m (thickness of layers, D_{max}, Plasticity)
- PI > 10 and $P_{0.5mm}$ > 15%: **pre-treatment with lime**





UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE

sirema

Mix design

- Phase 1: **Optimum dosage of water**
  - 3 dosages of water and 1 dosage of cement
  - SGC: 100 gyrations, 2.8 kg, closed mould
  - w_{opt} = water loss less than 0.3%
- **Build at least 3 sub-sections with different binder dosages** (w_{opt}, B/C ≥ 1)
- Phase 2: **Selection of bitumen and cement dosages**
  - ITSM and ITS at 25°C (curing: 40 °C for 72 h)
  - Design mixture: ITS ≥ 0.40 MPa; 3,000 ≤ ITSM ≤ 6,000 MPa
  - Design mixture (base): ITS ≥ 0.45 MPa; 3,000 ≤ ITSM ≤ 6,000
- Phase 3: **Field assessment**
  - $\gamma_{dry,field}$ ≥ 95% $\gamma_{dry,design}$
  - LWD ≥ 100 MPa after 2 h and 24 h





UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE

sirema

Construction

- Steel-drum vibrating roller compactor ≥ 140 kN
- **Pneumatic roller compactor ≥ 180 kN**
- Prime coat (1 kg/m^2 of residual bitumen) after 24 h (at least)



In-place recycling

- **Milling of the existing pavement for gradation and water verification at least one day before the mixing with binders**



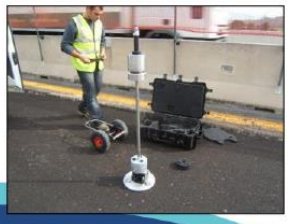
UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE

sirema

Acceptance testing

- Constituent materials
  - At the beginning and every month
- Mixture before and after binder blending
  - Every day or every 1,000 m^2
  - Water and bitumen content
  - Gradation
  - ITSM and ITS
- Layer
  - In-situ density
  - LWD
  - surface evenness
  - thickness





UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE

Lessons learnt

- **Stiff subgrade and foundation** (if possible, application of a prime coat)
- **Cold Recycled Materials can replace AC** increasing the layer thickness (ratio 1.3)
- **B/C ratio increases towards the surface** layer of the pavement
- **Rise the surface level** if possible

- **RA is not homogeneous** and binders help the performance stability
- **Filler content is very important** (RA does not contain "free" filler)
- **Water, better little than too much**

- **Evaporation rate** influence cement hydration and emulsion setting
- **Heavy pneumatic roller compactor**

UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE

Announcement

RILEM TC 308-PAR : Performance-based Asphalt Recycling

TG1 Performance based evaluation of cold recycled asphalt mixtures

- Evaluation of the evolutive behaviour and long-term performance of Cold Recycled Mixtures (CRM);
- Matching laboratory characterisation and field performance

https://www.rilem.net/groupe/308-par-performance-based-asphalt-recycling-441

Alan Carter, École de Technologie Supérieure, Montréal, Canada, alan.carter@etsmtl.ca

Andrea Grilli, Università Politecnica delle Marche, Ancona, Italy, a.grilli@univpm.it

Announcement

UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE

sirema

https://eata2025.com/

Conference Topics

Material properties
Asphalt mixture design
Pavement structural design and performance
Sustainable materials and construction
Pavement asset management
Pavement maintenance and preservation
Interaction of pavement structures and the environment
Pavement surface characteristics
Construction innovation
Smart Asphalt Pavements (A2X)

11TH EATA EUROPEAN ASPHALT TECHNOLOGY ASSOCIATION CONFERENCE



29



UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE

sirema

30

Announcement

UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE

MOBILITY CONFAP ITALY

The Mobility Confap (Conselho Nacional das Fundações Estaduais de Amparo à Pesquisa) Italy Program (MCI) is an **international program that facilitates and supports effective collaboration between Brazil and Italy**

https://site.unibo.it/mobility-confap-italy/en

https://site.unibo.it/mobility-confap-italy/en/research-opportunity-offers-in-italy/engineering-studies-and-architecture/innovative-solutions-for-pavement-design-and-maintenance

https://dicea.univpm.it/en/laboratories/laboratory-of-roads-and-transportation/

31

Announcement

UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE



Potential topics **include but are not limited to** the following:

- **laboratory investigations**
- **structural design**
- **full-scale testing**
- **case studies**
- **green technologies**
- **monitoring and prediction**
- **life cycle assessment**
- **additives and binders**
- **environmental impact reduction**
- technologies in the context of **extreme weather events**

32

Obrigado



Andrea Grilli
Università Politecnica delle Marche (Ancona, Italia)
a.grilli@univpm.it

33

Bibliography

- Graziani A., Grilli A., Mignini C., Balzi A., "Assessing the Field Curing Behavior of Cold Recycled Asphalt Mixtures," Advances in Materials Science and Engineering, vol. 2022, Article ID 4157090, 13 pages, 2022. https://doi.org/10.1155/2022/4157090.
- Ferrotti G. Grilli A., Mignini C. and Graziani A., "Comparing the Field and Laboratory Curing Behaviour of Cold Recycled Asphalt Mixtures for Binder Courses", Materials by MDPI, ISSN 1996-1944; CODEN: MATEG9, Materials 2020, Special Issue Characterization of Innovative Asphalt Materials for Use in Pavement Design and Analysis 13(21), 4697;
- Grilli A., Bocci E., Cardone F., "Mechanical behaviour of cement-bitumen treated materials containing different amounts of reclaimed asphalt", European Journal of Environmental and Civil Engineering, ISSN: 1964-8189 (Print) 2116-7214 (Online), 22:7, 836-851, DOI: 10.1080/19648189.2016.1219972, Volume 22, Issue 7, 2018.
- Grilli A., Graziani A., Bocci E., Bocci M. "Volumetric properties and influence of water content on compactability of recycled mixtures", Materials and Structures, ISSN 1359-5997, Volume 49, Number 10, DOI 10.1617/s11527-016-0792-x, 2016.
- Cardone F., Graziani A., Grilli A., Bocci M., "Curing and temperature sensitivity of cement-bitumen treated materials", International Journal of Pavement Engineering, Vol. 16, No. 10, 868–880, http://dx.doi.org/10.1080/10298436.2014.966710, 2015.
- Bocci M., Grilli A., Cardone F., Ferrotti G., "Full Depth Reclamation for the Rehabilitation of Local Roads: a Case Study", International Journal of Pavement Engineering, Volume 14, Issue 3, pp. 191–201, 2014.
- Grilli A., Bocci E., Graziani A., "Influence of reclaimed asphalt content on the mechanical behaviour of cement-treated mixtures", International Journal of Road Materials and Pavement Design, Special Issue on Stabilization and Recycling/Reclaimation of Highway Pavements with Hydraulic Binders, Vol. 14, No. 3, pag. 666–678, 2013.
- Grilli A., Graziani A., Bocci M., "Compactability and Thermal Sensitivity of Cement-Bitumen Treated Materials", International Journal of Road Materials and Pavement Design, Vol. 13, Issue 4, pp. 599-617, DOI: 10.1080/14680629.2012.742624, 2012.
- Bocci M., Grilli A., Cardone F., Graziani A, "A study on the mechanical behaviour of cement-bitumen treated materials", International Journal of Construction and Building Materials, Elsevier Science, ISSN: 0950-0618, Vol. 25, Issue 2, pp. 773-778, 2011.

34

ANEXO XVII

(Apresentação: "**Agenda ESG e Pavimentação: Estudo de Alternativas com Sustentabilidade Ambiental na Ecorodovias"** 3º Simpósio de Reciclagem de Misturas Asfálticas – SIREMA – São Carlos/SP - 27 de novembro de 2024)

Agenda ESG e Pavimentação: estudo de alternativas com sustentabilidade ambiental na Ecorodovias

Cláudio Renato Castro Dias
Grupo Ecorodovias

1

Agenda ESG e Pavimentação: estudo de alternativas com sustentabilidade ambiental na Ecorodovias

SUMÁRIO

- ✓UTILIZAÇÃO DE RAP EM CAUQ;
- ✓BSM: CONCEITOS
- ✓BSM: ESPUMA DE ASFALTO
- ✓BSM: EMULSÃO

2

Agenda ESG e Pavimentação: estudo de alternativas com sustentabilidade ambiental na Ecorodovias

UTILIZAÇÃO DE RAP EM MISTURAS USINADAS A QUENTE

Mistura composta de RAP (Reclaimed Asphalt Pavement), agregado mineral graduado, material de enchimento (filer), ligante asfáltico, e agente de reciclagem (quando necessário), usinada, espalhada e comprimida a quente.



ET-ECS.000.000-PAV/26 - PAVIMENTAÇÃO - ESPECIFICAÇÃO TÉCNICA PARA CONCRETO ASFÁLTICO RECICLADO EM USINA A QUENTE

3

Agenda ESG e Pavimentação: estudo de alternativas com sustentabilidade ambiental na Ecorodovias

UTILIZAÇÃO DE RAP EM MISTURAS USINADAS A QUENTE



ET-ECS.000.000-PAV/26 - PAVIMENTAÇÃO - ESPECIFICAÇÃO TÉCNICA PARA CONCRETO ASFÁLTICO RECICLADO EM USINA A QUENTE

4

Agenda ESG e Pavimentação: estudo de alternativas com sustentabilidade ambiental na Ecorodovias

UTILIZAÇÃO DE RAP EM MISTURAS USINADAS A QUENTE

Concreto Asfáltico com Fresado



5

Agenda ESG e Pavimentação: estudo de alternativas com sustentabilidade ambiental na Ecorodovias

UTILIZAÇÃO DE RAP EM MISTURAS USINADAS A QUENTE

Redução de CAP

RAP	CAP
25%	16%
20%	22%
15%	



teor de Asfalto com borracha s/incorporação	4,50%
teor de Asfalto com borracha e RAP (15%)	3,80%

teor de Asfalto com borracha s/incorporação	4,50%
teor de Asfalto com borracha e RAP (25%)	3,50%

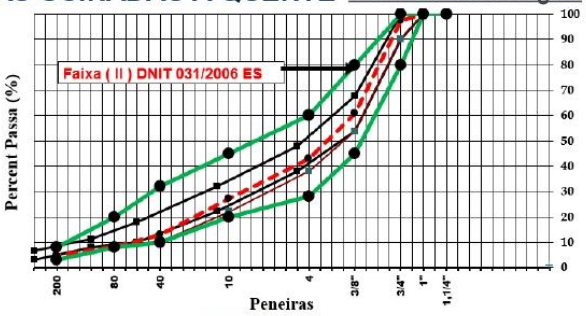
6

Agenda ESG e Pavimentação: estudo de alternativas com sustentabilidade ambiental na Ecorodovias

UTILIZAÇÃO DE RAP EM MISTURAS USINADAS A QUENTE Controle Tecnológico

Descrição	Especificação Ecorodovias PAV/17	Ensaio Laboratório
Estabilidade	>800 kgf	1061
Resistência à tração	0,75 Mpa	0,88
Relação Filler Betume	0,6 a 1,4	1,1

** resultados de laboratório referentes a 8 ensaios de controle de mistura



7

Agenda ESG e Pavimentação: estudo de alternativas com sustentabilidade ambiental na Ecorodovias

UTILIZAÇÃO DE RAP EM MISTURAS USINADAS A QUENTE Controle Tecnológico

DETERMINAÇÃO DO DANO POR UMIDADE INDUZIDA

Solicitante:	Ecosul
Mistura:	037/21 - GAP GRADED + 20% RAP - Ecoflex B-3G - Teor de Ligante 3,75%
Operador:	Bethania e Livia
Ligante:	Ecoflex B-3G
Data:	23/02/2022
Norma:	DNIT 180/2018-ME

Identificação			Geometria		Pesos			Densidades		Vazios	Saturação	RBT		Resistência à Tração	
% CAP	GOLPES	Nº CP	h (cm)	d(cm)	Seco	Imerso	Sss	D aparente	Dmáx medida	vv (%)	S (%)	Grupo	RT (MPa)	S/COND	COND
3,75%		53	6,20	10,00	1076,4	615,1	1083,6	2,298	2,446	6,1	64	C	1,14		1,14
3,75%		54	6,20	10,00	1075,9	615,0	1082,7	2,300	2,446	6,0		S	1,28	1,28	
3,75%	Comp.	55	6,24	10,00	1075,9	612,5	1084	2,282	2,446	6,7		S	1,20	1,20	
3,75%	Giratório	56	6,21	10,00	1075,6	614,0	1082,4	2,296	2,446	6,1		S	1,23	1,23	
3,75%		58	6,22	10,00	1076,3	614,4	1083,7	2,293	2,446	6,2	62	C	1,01		1,01
3,75%		59	6,24	10,00	1076,4	610,1	1083,1	2,276	2,446	7,0	63	C	1,20		1,20

C Condicionados
S sem condicionamento

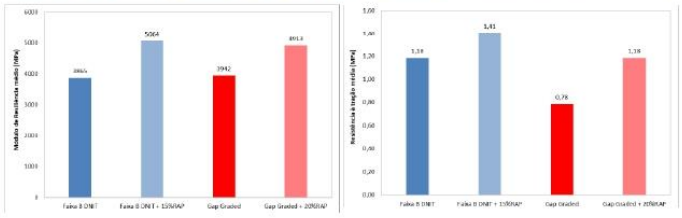
1,24	1,12
RRT =	90%

8

Agenda ESG e Pavimentação: estudo de alternativas com sustentabilidade ambiental na Ecorodovias

UTILIZAÇÃO DE RAP EM MISTURAS USINADAS A QUENTE Controle Tecnológico





MR & RT

9

Agenda ESG e Pavimentação: estudo de alternativas com sustentabilidade ambiental na Ecorodovias

UTILIZAÇÃO DE RAP EM MISTURAS USINADAS A QUENTE

Ecosul (2019) → 225.741 ton (20%)

Ecoponte (2022) → 12.573 ton (15%)

Eco 135 (2024) → 10.511ton (20%)

Ecovias do Cerrado (2024) → 9.000 ton (15%)

Ecovias (2024) → 2.998 ton (20%)

Eco 050; Eco RioMinas; Ecovias do Araguaia; Econoroeste; Ecopistas; Eco 101 → à implementar



10

Agenda ESG e Pavimentação: estudo de alternativas com sustentabilidade ambiental na Ecorodovias

UTILIZAÇÃO DE RAP EM MISTURAS USINADAS A QUENTE

260.863 TON **DE MISTURAS ASFÁLTICAS COM FRESADO**

51.094 TON **DE RAP**

5.109 **CARGAS TRANSPORTADAS**

72 KM **DE FILA DE CAMINHÕES AGREGADOS**

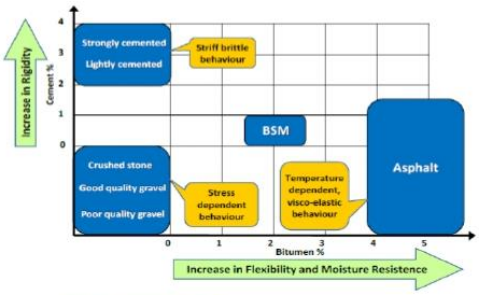


11

Agenda ESG e Pavimentação: estudo de alternativas com sustentabilidade ambiental na Ecorodovias

MATERIAIS ESTABILIZADOS COM BETUME (BSM)

"gotas de betume revestem os agregados finos e formam um *mastique* que se dispersa pelos entre os agregados grossos não revestidos pelo betume e, devido a este fato, ocorre a **não aglutinação de todos os agregados pelo betume**, o comportamento destas misturas é similar à de **misturas granulares, mas com maior coesão e menor sensibilidade a umidade**."

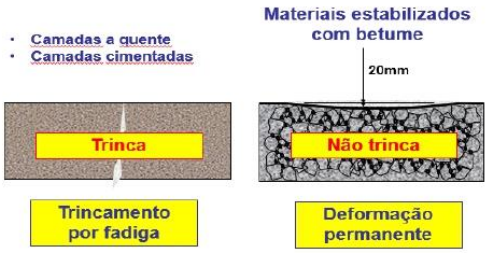


12

Agenda ESG e Pavimentação: estudo de alternativas com sustentabilidade ambiental na Ecorodovias

MATERIAIS ESTABILIZADOS COM BETUME (BSM)

Critério de falha do pavimento



Fonte: apresentação de Valmir Bonfim

13

Agenda ESG e Pavimentação: estudo de alternativas com sustentabilidade ambiental na Ecorodovias

MATERIAIS ESTABILIZADOS COM BETUME (BSM)

- **SABITA TG2 – Technical Guideline: Bitumen Stabilised Materials**;
- ARRA CR 201 AND FDR 201 – EUA ;
- **Austroads - Guide to Pavement Technology Part 4D: Stabilised Materials**;
- Wirtgen – Technical Guideline: Bitumen Stabilised Materials;
- DNIT 166/2013 – ES - Reciclagem de pavimento a frio “in situ” com adição de espuma de asfalto.

14

Agenda ESG e Pavimentação: estudo de alternativas com sustentabilidade ambiental na Ecorodovias

MATERIAIS ESTABILIZADOS COM BETUME (BSM)

TG2 - Modelo Stelenbosch

$$\log N = A - 57.286(DSR)^3 + 0.0009159(P_{MMD}.RetC)$$

$$DSR = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_{1,f} - \sigma_3}$$

Austroads

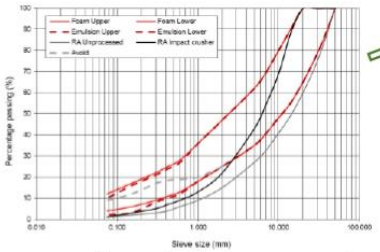
$$N = \left[\frac{6918(1.08 + 0.85V_b)}{S_{mix}^{0.36}\ x\ \mu\varepsilon}\right]^5$$

Fase 01: Fadiga
Fase 02: TG2

15

Agenda ESG e Pavimentação: estudo de alternativas com sustentabilidade ambiental na Ecorodovias

MATERIAIS ESTABILIZADOS COM BETUME (BSM) – DOSAGEM TG2



- Granulometria dependente do processamento do RAP;
- Sem limites para porcentagem de RAP

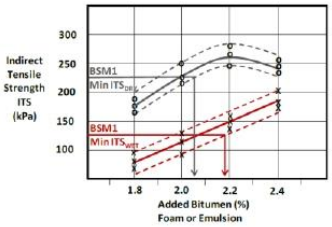
Fraction Passing 0.075 mm Sieve (%)	Bitumen Addition (% by mass of dry aggregate) Fraction Passing 4.75 mm Sieve		Typical Material Types
	< 50%	>50%	
< 4	2.0	2.0	Recycled asphalt (RA)
4 – 7	2.2	2.4	Recycled asphalt Graded crushed stone Natural gravel
7 – 10	2.4	2.8	Blends
> 10	2.6	3.0	Gravels Sands

- Teor de betume em função do teor de RAP e da porcentagem passando a peneira #200

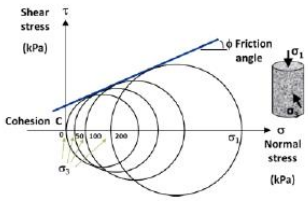
16

Agenda ESG e Pavimentação: estudo de alternativas com sustentabilidade ambiental na Ecorodovias

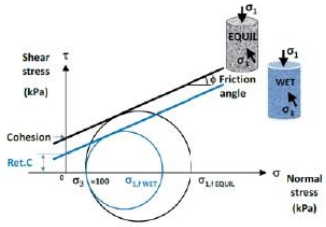
MATERIAIS ESTABILIZADOS COM BETUME (BSM) – DOSAGEM TG2



Determinação do teor de ligante



Resultados do triaxial monotônico



Avaliação da coesão retida no ensaio triaxial

17

Agenda ESG e Pavimentação: estudo de alternativas com sustentabilidade ambiental na Ecorodovias

MATERIAIS ESTABILIZADOS COM BETUME (BSM) – DOSAGEM TG2

Class	RA (%)	ITS (kPa)[1]		Triaxial		
		ITS_{DRY}	ITS_{WET}	Cohesion (kPa)	Friction Angle (°)	Retained Cohesion (%)
BSM 1	< 50%	225	125	250	40	75
	50 – 100%	225	125	265	38	75
BSM 2	< 50%	175	100	200[2]	38	65
	50 – 100%	175	100	225	35	75

18

9

Agenda ESG e Pavimentação: estudo de alternativas com sustentabilidade ambiental na Ecorodovias

MATERIAIS ESTABILIZADOS COM BETUME (BSM)

Reciclagem em usina

- ✓ Possibilidade de verificação substrato
- ✓ Maior controle da mistura
- ✓ Possibilidade de estocagem de material

Reciclagem in situ

- ✓ Maior velocidade de execução
- ✓ Menor transporte de materiais
- ✓ Maior redução de emissões

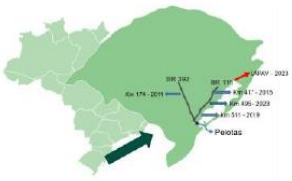
19

Agenda ESG e Pavimentação: estudo de alternativas com sustentabilidade ambiental na Ecorodovias

MATERIAIS ESTABILIZADOS COM BETUME (BSM)



Estabilização com Espuma de Asfalto



Estabilização com Emulsão

20

Agenda ESG e Pavimentação: estudo de alternativas com sustentabilidade ambiental na Ecorodovias

MATERIAIS ESTABILIZADOS COM BETUME (BSM)



Estabilização com Espuma de Asfalto

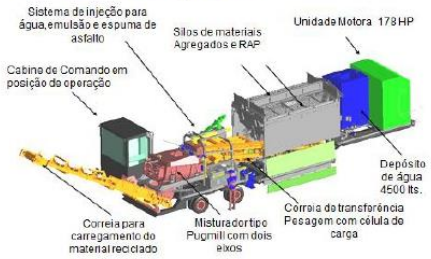
Ano	extensão	área
	km	m2
2012	42,49	152.964
2016	7,12	25.632
2018	0,36	1.296
2024	5,50	19.800
total	**55,47**	**199.692**

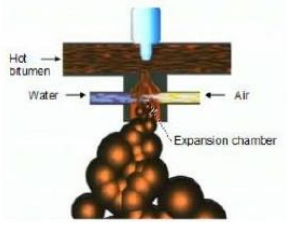
21

Agenda ESG e Pavimentação: estudo de alternativas com sustentabilidade ambiental na Ecorodovias

MATERIAIS ESTABILIZADOS COM BETUME (BSM) - Espuma de Asfalto

Desenho esquemático da Usina Móvel do tipo KMA



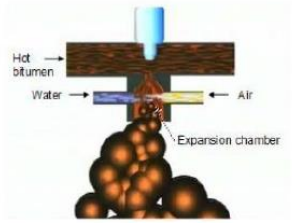


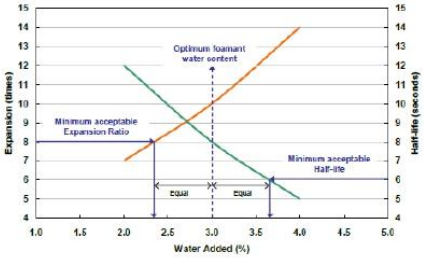
Fonte: apresentação de Valmir Bonfim

22

Agenda ESG e Pavimentação: estudo de alternativas com sustentabilidade ambiental na Ecorodovias

MATERIAIS ESTABILIZADOS COM BETUME (BSM) - Espuma de Asfalto





23

Agenda ESG e Pavimentação: estudo de alternativas com sustentabilidade ambiental na Ecorodovias

MATERIAIS ESTABILIZADOS COM BETUME (BSM) - Espuma de Asfalto



Execução 2012

- ✓ Base cimentada deteriorada
- ✓ Alto volume de tráfego
- ✓ Rodovia sem controle de carga

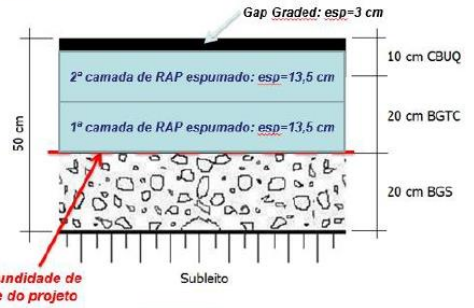
Fonte: apresentação de Valmir Bonfim

24

Agenda ESG e Pavimentação: estudo de alternativas com sustentabilidade ambiental na Ecorodovias

MATERIAIS ESTABILIZADOS COM BETUME (BSM) - Espuma de Asfalto

Execução 2012



Fonte: apresentação de Valmir Bonfim

25

Agenda ESG e Pavimentação: estudo de alternativas com sustentabilidade ambiental na Ecorodovias

MATERIAIS ESTABILIZADOS COM BETUME (BSM) - Espuma de Asfalto

Execução 2012

- ✓ Instalação usina móvel
- ✓ Fresagem do Pavimento
- ✓ Aplicação e compactação da 1º camada
- ✓ Aplicação e compactação da 2º camada
- ✓ Aplicação Gap Graded

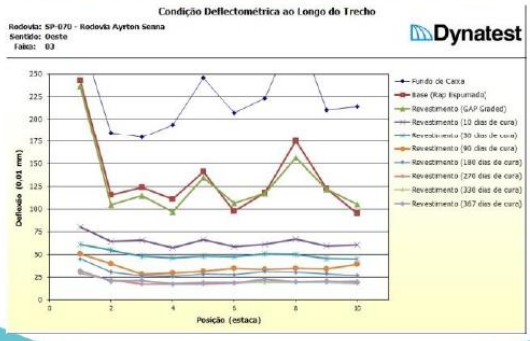


Fonte: apresentação de Valmir Bonfim

26

Agenda ESG e Pavimentação: estudo de alternativas com sustentabilidade ambiental na Ecorodovias

MATERIAIS ESTABILIZADOS COM BETUME (BSM) - Espuma de Asfalto

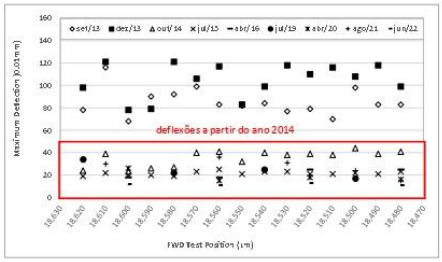


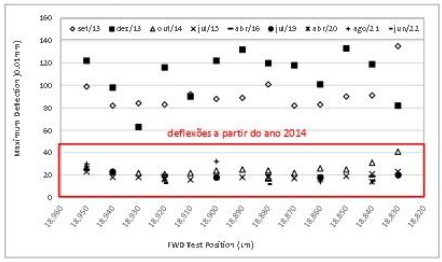
Fonte: apresentação de Valmir Bonfim

27

Agenda ESG e Pavimentação: estudo de alternativas com sustentabilidade ambiental na Ecorodovias

MATERIAIS ESTABILIZADOS COM BETUME (BSM) - Espuma de Asfalto



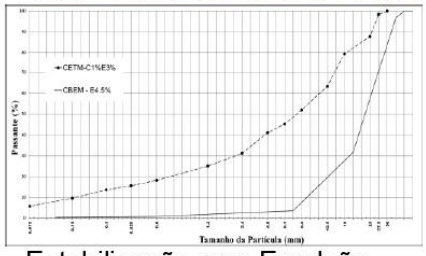


*Intervenções apenas superficias em 2020/2021 - sem necessidade de fresagem

28

Agenda ESG e Pavimentação: estudo de alternativas com sustentabilidade ambiental na Ecorodovias

MATERIAIS ESTABILIZADOS COM BETUME (BSM) - emulsão



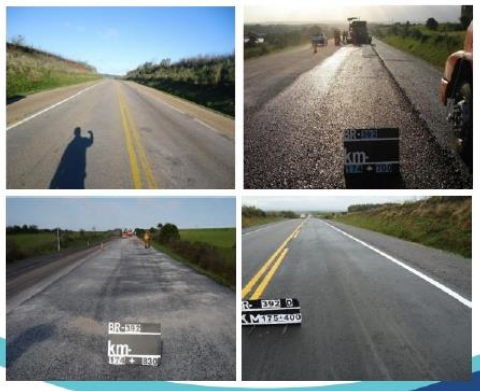
Estabilização com Emulsão

Cold Bituminous Emulsion Mix CBEM (2011 e 2015)	DNER ES-P-106/80 - DNIT ET-DE-P00/026– DER-SP Asphalt Treated Permeable Base (ATPB) → Caltrans
Cement Emulsion Treated Mix CETM (2019)	Technical Guideline TG2 Agregado + RAP + Emulsão + Cimento

29

Agenda ESG e Pavimentação: estudo de alternativas com sustentabilidade ambiental na Ecorodovias

MATERIAIS ESTABILIZADOS COM BETUME (BSM) - emulsão



2011

Layer	Thickness (mm)
New asphalt concrete	40
CBEM	100
Old asphalt concrete	120
Gravel base	400
Subgrade	-

30

Agenda ESG e Pavimentação: estudo de alternativas com sustentabilidade ambiental na Ecorodovias

MATERIAIS ESTABILIZADOS COM BETUME (BSM) - emulsão



2015

Layer	Thickness (mm)
New asphalt concrete	60
CBEM	120
Old asphalt concrete	300
Soil base	400
Subgrade	-

31

Agenda ESG e Pavimentação: estudo de alternativas com sustentabilidade ambiental na Ecorodovias

MATERIAIS ESTABILIZADOS COM BETUME (BSM) - emulsão



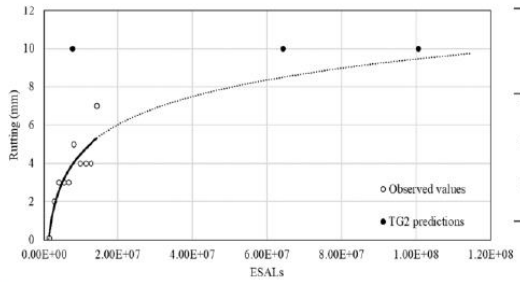
2019

Layer	Thickness (mm)
New asphalt concrete	30
CETM	130
Old asphalt concrete	300
Soil base	400
Subgrade	–

32

Agenda ESG e Pavimentação: estudo de alternativas com sustentabilidade ambiental na Ecorodovias

MATERIAIS ESTABILIZADOS COM BETUME (BSM) - emulsão



Test section	Type of Mix	Rutting (mm) 2018		Rutting (mm) 2019		Rutting (mm) 2020		Rutting (mm) 2021	
		% > 10 mm	Average	% > 10mm	Average	% > 10 mm	Average	% > 10mm	Average
BR-392 (2011)	CBEM	0%	4	0%	4	0%	4	7%	7
BR-116 (2015)	CBEM	0%	3	0%	3	0%	3	0%	5
BR-116 (2019)	CETM	-	-	-	-	0%	0.1	0%	2

33

Agenda ESG e Pavimentação: estudo de alternativas com sustentabilidade ambiental na Ecorodovias

MATERIAIS ESTABILIZADOS COM BETUME (BSM) - emulsão

Km 495 da BR116 → RDT Ecosul/LAPAV (2023/2024)



34

Agenda ESG e Pavimentação: estudo de alternativas com sustentabilidade ambiental na Ecorodovias

MATERIAIS ESTABILIZADOS COM BETUME (BSM) - emulsão

Pista Experimental→ RDT Ecosul/LAPAV (2023)

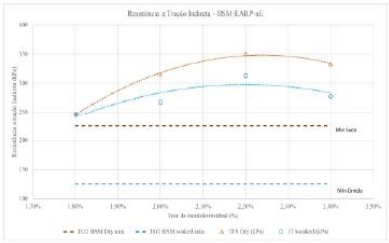


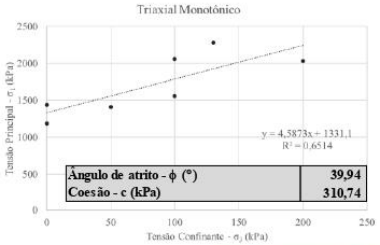
35

Agenda ESG e Pavimentação: estudo de alternativas com sustentabilidade ambiental na Ecorodovias

MATERIAIS ESTABILIZADOS COM BETUME (BSM) - emulsão

Pista Experimental→ RDT Ecosul/LAPAV (2023)





MR (MPa)
Mínimo: 654
Máximo: 2057
Médio: 1299

$MR = k_1 \times \sigma_3^{k_2} \times \sigma_d^{k_3}$

k_1	k_2	k_3
4269	0,41	0,03

R^2 0,851

36

Agenda ESG e Pavimentação: estudo de alternativas com sustentabilidade ambiental na Ecorodovias

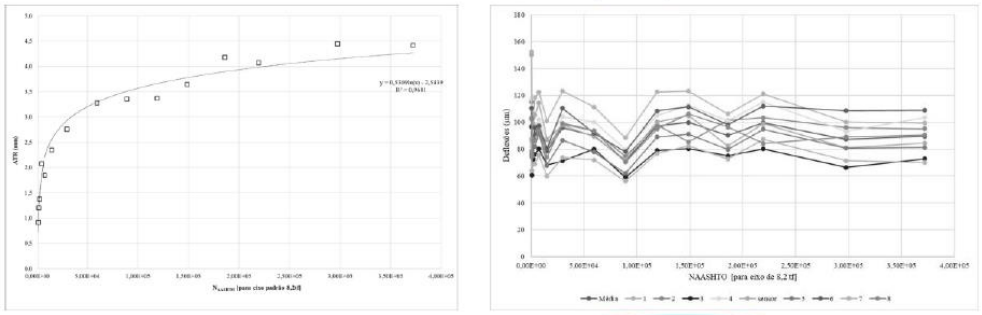
MATERIAIS ESTABILIZADOS COM BETUME (BSM) - emulsão



37

Agenda ESG e Pavimentação: estudo de alternativas com sustentabilidade ambiental na Ecorodovias

MATERIAIS ESTABILIZADOS COM BETUME (BSM) - emulsão



38

Agenda ESG e Pavimentação: estudo de alternativas com sustentabilidade ambiental na Ecorodovias

MATERIAIS ESTABILIZADOS COM BETUME (BSM)

Ecopistas → espuma em usina → em andamento;

Ecovias do Cerrado → espuma em usina → inicio de obra;

Eco 050 → FDR → 2025 → em contratação;

Eco RioMinas → FDR → 2025 → finalizando projeto;

Ecovias do Araguaia → FDR → 2025 → finalizando projeto;



39

Agenda ESG e Pavimentação: estudo de alternativas com sustentabilidade ambiental na Ecorodovias

DEMAIS APLICAÇÕES DE USO DE FRESADO

Microrevestimento com RAP → Ecopistas & Ecovia dos Cerrados

FATC → Reparos profundos e Reciclagens

PMF com RAP → preenchimentos de acostamentos

40

20



Cláudio Renato Castro Dias
Grupo Ecorodovias
(11) 96470-9597

41

21

ANEXO XVIII

(Proposta de Minuta de Norma para o IPR DNIT)

Proposta de norma: Dosagem de Misturas Recicladas a Frio com Emulsão Asfáltica para Camadas de Base e Sub-base

RESUMO

Esta norma especifica o método de dosagem para a determinação do teor de emulsão residual para satisfazer parâmetros mínimos de resistência à tração (RT), com corpos de prova moldados no compactador giratório ou vibratório. Este método é uma alternativa rápida e simples para a orientar projetista que desejam obter um material reciclado estabilizado com emulsão asfáltica e cimento para utilização em camadas de base e sub-base rodoviárias. Define o teor mínimo de emulsão asfáltica residual necessário para estabilizar o material e atingir as resistências mínimas preconizadas.

PREFÁCIO

Esta proposta de norma foi elaborada a partir de um projeto desenvolvido com Recursos de Desenvolvimento Tecnológico (RDT) da Agência Nacional de Transportes Terrestres (ANTT), denominado "ESTUDO DE COMPÓSITOS DE CIMENTO, EMULSÃO COM FRESADO ASFÁLTICO E AGREGADOS VIRGENS PARA BASES DE ELEVADO DESEMPENHO". Este foi fomentado pela Empresa Concessionária de Rodovias do Sul S/A (Ecosul) em parceria com o Laboratório de Pavimentação da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (LAPAV/UFGRS). Esta proposta está incorporada no projeto supracitado, que visa a submissão para o Instituto de Pesquisas em Transportes (IPR) do Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (DNIT), como sugestão para normalização nacional para parâmetros de materiais asfálticos reciclados com emulsão asfáltica.

1 Objetivo

O objetivo desta norma é apresentar os métodos para dosagem em laboratório de material reciclado a frio estabilizado com emulsão asfáltica e cimento e/ou cal, para o uso em camadas inferiores de pavimentos, excluindo-se as etapas de campo e controle.

2 Referências normativas

Os documentos relacionados a seguir são indispensáveis à aplicação desta Norma. Para referências datadas, aplicam-se somente as edições citadas. Para referências não datadas, aplicam-se as edições mais recentes do referido documento (incluindo emendas).

ABNT NBR 6457, Solos — Preparação de amostras para ensaios de compactação, caracterização e determinação do teor de umidade

ABNT NBR 7180, Solo — Determinação do limite de plasticidade

ABNT NBR 7182, Solo — Ensaio de compactação

ABNT NBR 11579, Cimento Portland — Determinação do índice de finura por meio da peneira 75 µm (nº 200)

ABNT NBR 12052, Solo ou agregado miúdo — Determinação do equivalente de areia — Método de ensaio

ABNT NBR 15900-1 Água para amassamento do concreto - Parte 1: Requisitos

ABNT NBR 16697, Cimento Portland – Requisitos

ABNT Projeto de norma 034:000.001-010 Misturas asfálticas — Reciclagem profunda a frio in situ com emulsão asfáltica

DER-SP ET-DE-P00/055, Reciclagem de pavimento asfáltico em usina com emulsão

ARRA FDR201(2023), Recommended Mix Design Guidelines For Full Depth Reclamation (FDR) Using Emulsified Asphalt Stabilizing Agent

ARRA CR 201 (2023), Recommended Mix Design Guidelines For Cold Recycling Using Bituminous Recycling Agents

DNER-ME 162/94 - Solos - ensaio de compactação utilizando amostras trabalhadas

DNIT 418/2019 – EM – Pavimentação – Solo-Cal – Cal Virgem e Cal Hidratada – Especificação de Material

DNIT 425/2020-ME - Pavimentação – Agregado – Determinação do índice de forma com paquímetro - Método de ensaio

DNIT 446/2024 – ME – Agregados – Avaliação da durabilidade pelo emprego de soluções de sulfato de sódio ou magnésio – Método de ensaio

DNIT 450/2024 – ME – Equivalente de areia – Método de ensaio

DNIT 453/2024 – EM – Peneiras de malhas quadradas para análise granulométrica de solos e agregados – Especificação de Material.

DNIT 451/2024 – ME – Agregados – Determinação do desgaste por abrasão e impacto no equipamento "Los Angeles" – Método de ensaio

SABITA (2020). Technical Guideline (TG2) : Bitumen Stabilised Materials Southern African Bitumen Association (Sabita).

3 Definição

Para efeito desta norma aplicam-se as seguintes definições:

3.1 Reciclagem em Usina

Processo de mistura em usina de material reaproveitado com composição total ou parcial; incorporação de cimento Portland ou cal, emulsão asfáltica e adição de água, e incorporação, quando necessária, de agregados virgens. Obtendo-se assim um material reciclado a ser transportado para o campo.

3.2 Reciclagem profunda *in situ*

Processo de restauração de pavimento executado no local, com reaproveitamento total ou parcial do revestimento existente, normalmente com incorporação de parte ou de toda base existente; incorporação de cimento Portland ou cal, emulsão asfáltica e adição de água, além da incorporação, quando necessário de agregados, espalhamento e compactação da mistura resultante, obtendo-se desta forma uma nova base do pavimento, isto é, uma base reciclada.

3.3 Resistência à tração por compressão diametral (RT)

Máxima tensão de tração suportada pela amostra quando submetida à compressão diametral, sendo o ensaio realizado a 25 ºC.

3.4 Teor Ótimo de Fluídos (TOF)

Teor de umidade ideal de um solo ou material, em que ele atinge sua máxima massa específica aparente seca, determinado no ensaio de compactação.

4 Aparelhagem

Para este procedimento de ensaio é necessária a seguinte aparelhagem:

4.1 Equipamento de Compactação

Recomenda-se o uso de compactador giratório eletromecânico, eletrohidráulico ou eletropneumático, com molde cilindro metálico de 150,00mm de diâmetro. Alternativamente, pode-se utilizar compactador vibratório com sapata para uso em molde cilíndrico de 150mm de diâmetro. O sistema é composto por um sistema elétrico vibratório com energia de impacto de 23J e um suporte com base para apoio do molde. Haste de impacto composta por disco diâmetro de 148mm com encaixe especial. Comprimento mínimo da haste com o disco 340 mm. O conjunto total deve possuir 33 kg.
OBS: Não se recomenda a compactação Marshall devido ao tamanho dos agregados que compõem o material.

4.2 Demais equipamentos

a) Balança de precisão com capacidade nominal adequada para determinar a massa do corpo de prova (dentro e fora do cilindro), com acurácia de 0,2 %.
b) Balança de precisão com capacidade nominal de 2 kg e resolução de 0,01 g.
c) Estufa capaz de manter a temperatura a 110 ºC ± 5 ºC.
d) Estufa capaz de manter a temperatura a 40 ºC ± 5 ºC.
e) Cápsulas de alumínio ou outro material adequado.
f) Peneiras de malha quadrada, conforme a norma DNIT 453-EM.
g) Sacos plásticos, hermeticamente vedado.
h) Recipientes e utensílios de laboratório, necessários para a preparação das amostras de solo.

5 Condições Gerais

O processo de dosagem estabelecido nesta norma, bem como os parâmetros adotados deve considerar que o material obtido apresenta teor limitado entre 1% e 3,0% de emulsão asfáltica residual sobre a massa total da mistura. O teor de cimento ou cal é limitado a 1%

da massa total da mistura. O material fresado utilizado na obtenção do material reciclado considera a granulometria correspondente ao material em seu estado natural, seco, sem a extração do ligante asfáltico, sendo caracterizado como "Black rock". Adicionalmente para a completa caracterização deve-se proceder à determinação do teor de ligante presente no material fresado reciclado (RAP - Reclaimed Asphalt Pavement).

6 Materiais

A composição dos materiais reciclados estabilizados a frio com emulsão asfáltica varia de acordo com a necessidade e disponibilidade de materiais. Normalmente é constituído de fresado asfáltico, agregados virgens miúdo e/ou graúdo (se necessária correção granulométrica), cimento e/ou cal, água e emulsão asfáltica. Esses materiais devem ser avaliados na fase de dosagem e só podem ser utilizados se atenderem às especificações indicadas nesta Norma.

6.1 Agregado Adicional

Os agregados adicionais, quando necessária sua incorporação, de modo a correção granulométrica da mistura, deve ser constituída por agregados britados, com formatos cubico, durável, sem partículas alongadas ou lamelares, duro, limpo e sem a presença de contaminações. Deve atender aos requisitos:

- Desgaste Los Angeles igual ou inferior a 50% (DNIT 451/2024);
- Perda no ensaio de durabilidade, conforme DNIT 446/2024 – ME, em cinco ciclos, com solução de sulfato de sódio, deve ser inferior a 20% e, com sulfato de magnésio, inferior a 30%.
- Índice de forma superior ou igual a 0,5 (DNIT-ME 425/2020);
- O equivalente de areia do agregado miúdo, pó de pedra ou areia, deve ser igual ou superior a 55%, conforme NBR 12052;
- No caso de emprego de seixos rolados britados, exige-se que 90 % dos fragmentos, em peso, apresentem pelo menos uma face fragmentada.

6.2 Água

Deve ser isenta de teores nocivos de sais, ácidos, álcalis ou matéria orgânica e outras substâncias prejudiciais, conforme ABNT NBR 15900-1.

6.3 Material de Enchimento Filler

A adição de Cal hidratada ou Cimento Portland tem a função de auxiliar a coesão e a resistência do material a ação da água. Contudo, limita-se a quantidade de aglomerante a 1% me massa de material seco a ser reciclado. O tipo e a quantidade de aglomerante deve ser definido em estudo de laboratório visando a melhor resistência à tração.
A cal deve atender as especificações da norma DNIT 418/2019-EM. O cimento deve atender aos requisitos da Norma ABNT NBR 16697

6.4 Emulsão asfáltica

A emulsão asfáltica a ser utilizada deve ser do tipo especifica para a reciclagem de pavimentos, devendo atender a norma a norma atualizada que substituirá o Regulamento Técnico nº 289/2022 da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis – ANP, apresentada no Anexo A, ou a especificação que estiver em vigor na época de sua utilização.

6.5 Fresado

O fresado asfáltico deve ser obtido através de amostragem em pista. Deve-se realizar a correta identificação e caracterização o material coletado deve ser representativo do trecho a ser reciclado ou utilizado para a reciclagem. A caracterização deve considerar a identificação de seções homogêneas ao longo do trecho, caso a reciclagem seja realizada em campo. Alternativamente, em situações em que o fresado esteja armazenado em depósitos, é necessário coletar amostras representativas para a definição da curva granulométrica característica da pilha.

6.6 Mistura Reciclada

A granulometria do material deve respeitar faixas granulométricas utilizadas para reciclagem de pavimentos. Os requisitos a serem atendidos, independente da curva granulometria a ser adotada pelo projetista, são:

a) Tamanho máximo do agregado da faixa adotada deve ser inferior a 2/3 da espessura da camada compactada;

b) O diâmetro máximo do agregado não deve ultrapassar 1 ½" (37,5mm)
c) Equivalente de areia da mistura reciclada maior que 30 % (DNIT 450/2024 – ME);
d) índice de plasticidade da mistura reciclada menor que 6 % (ABNT NBR 7180).

7 Descrição do Método

7.1 Procedimentos iniciais

Os agregados provenientes da amostra de fresado + agregados virgens, se necessário, são acondicionados em estufa a 40 °C até a constância de massa.

7.2 Determinação Teor ótimo de fluidos e densidade máxima aparente seca

Com o material seco, deve-se realizar o ensaio de compactação para a determinação do teor ótimo de fluidos (TOF) e a densidade máxima apresente seca do material, por meio do ensaio de Proctor na energia modificada com o cilindro grande.

O ensaio deve ocorrer em conformidade com a norma DNIT-ME 162/94 ou alternativamente em conformidade com a norma ABNT NBR 7182. Para a realização desse ensaio, deve-se realizar a preparação da amostra conforme a norma ABNT NBR 6457.

A partir da determinação do TOF, consegue-se realizar a determinação da quantidade de emulsão a ser adicionada a mistura para as diferentes variações no processo de dosagem. Assim, com o auxílio da Equação (1), o teor ótimo de fluidos corresponde:

$$TOF = TAE + TER + TAD \quad (1)$$

Onde:

TOF = Teor ótimo de fluidos (%);

TAE = teor de água na emulsão;

TER = teor de asfalto residual como porcentagem de agregado seco (%)

TAD = Teor de água adicional

Nota 1 : TAE+TER = Teor total de Emulsão Adicionada.

Nota 2: Todos os agregados devem entrar na condição seca e sem água;

Ao aplicar a emulsão na mistura, é importante ter-se um mínimo de 1 a 2% de umidade no agregado.

7.3 Moldagem corpos de prova

Deve-se moldar seis corpos de prova para cada teor de emulsão, com as dimensões de 150 mm de diâmetro e 95 mm de altura. A variação de quantidade de emulsão varia para se obter o ponto ótimo. Recomenda-se que a faixa de teores de ligante residual da emulsão EARP deve variar entre 2 % e 3 % em massa, obtendo-se no mínimo 4 teores diferentes variando em incrementos de ±0,25 %. Para se atingir o TOF, a diferença entre o TOF e o teor de emulsão determinado, deve ser igual a quantidade de água de misturação a ser adicionada.

A compactação do material deve ocorrer com o auxílio do compactador giratório ou alternativamente com um compactador vibratório de 23 Joules.

Quando compactado com o compactador giratório, as amostras devem ser compactadas em temperatura ambiente de (25 ± 4°C), em camada única. A pressão de compactação deve ser de 600 kPa, ângulo de giro de 1,25° e número de giros necessários para o atingimento da densidade relativa aparente seca máxima, Gmb, obtida por meio de Proctor em energia modificada.

Quando compactado com o compactador vibratório, as amostras devem ser compactadas em temperatura ambiente de (25 ± 4°C). Deve-se realizar a compactação em duas camadas. O tempo de compactação não deve ser superior a dois minutos por camada. Para a compactação vibratória considera-se a utilização de duas camadas. Caso, não seja atingida as densidades, deve-se realizar a compactação em três camadas.

7.4 Procedimento de Cura

Uma vez extraídos os corpos de prova de seus respectivos moldes e marcados, são colocados em estufa de ventilação forçada a temperatura de 40 °C (±1 °C) por um período mínimo de 72 horas (3 dias) ou até a constância do peso. A cura dos corpos de prova gera a condição "Seca" para o teste.

Após 72 horas, retirar os corpos de prova da estufa e pesar individualmente, registrando suas respectivas massas. Em seguida, retornar todas as amostras à estufa a 40 °C por mais 4 horas, repetindo-se a pesagem. Se a massa de qualquer amostra diminuir mais de 10 g, todas as amostras devem ser novamente colocadas na estufa por mais 24 horas. Esse procedimento deve ser repetido quantas vezes forem necessárias até que os corpos de prova atinjam massa constante.

Os corpos de prova devem, então, ser deixados para resfriar até alcançar uma temperatura constante de 25 °C (±2 °C). Após um tempo mínimo de resfriamento de 20 horas, deve-se determinar a densidade aparente de cada corpo de prova.

Exclua do teste qualquer corpo de prova cuja densidade aparente difira da densidade aparente média de todas as seis amostras em mais de 2,5%.

Colocar metade dos corpos de prova submersos em água, em banho de imersão, durante 24 horas a 25 °C (±2 °C). Após a imersão, remover as amostras da água, secar a superfície e proceder imediatamente ao ensaio.

8 Parâmetros de Resistencia

O material deve possuir parâmetros de resistência mínimos, obtidos a partir de dosagem e rompimento de corpos de prova 150mm de diâmetro por 95mm de altura, moldados no compactador giratório ou vibratório. A Tabela 1 apresenta os parâmetros mínimos de resistência à tração na compressão diametral a serem obtidos.

Tabela 1: Parâmetros de resistência

RAP	ITS (kPa)	
	RT seco	TR úmido
< 50%	225	125
≥ 50%	225	125

Fonte: Sabita (2020)

Recomenda-se, adicionalmente, a realização de ensaios de compressão triaxial para a determinação dos parâmetros de coesão e ângulo de atrito, observando-se os limites de 250 kPa para a coesão e 40° para o ângulo de atrito.

9 Apresentação do Projeto de mistura de reciclagem

O relatório do projeto de dosagem deve conter os seguintes dados mínimos:

a) Teor residual de emulsão asfáltica, TOF, cimento ou cal, em proporção do total de massa dos agregados.
b) A densidade máxima aparente seca;

A resistência à tração indireta obtida.

Anexo A
Especificação para emulsão asfáltica EARP

Características das emulsões asfálticas para serviços de reciclagem de revestimento, reciclagem profunda e estabilização de solos

Características	Métodos de ensaio	Ruptura controlada				
		EAR1	**EAR2**	**EAR2-E**	**EARP**	**EAES**
Indicação preferencial de uso		Reciclagem de revestimento asfáltico com uso parcial de fresado	Reciclagem de revestimento asfáltico com uso de 100 % fresado	Reciclagem de revestimento asfáltico com uso de 100 % fresado	Reciclagem profunda	Estabilização de solos *in situ*
Ensaio sobre a emulsão						
a) Viscosidade *Saybolt Furol*, S, a 25 ºC	ABNT NBR 14491	90 máx.	90 máx.	90 máx.	100 máx.	50 máx.
b) Sedimentação, (±) em massa	ABNT NBR 6570	5	5	5	5	10
c) Peneiração, 0,84 mm, % em massa, máx.	ABNT NBR 14393	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
d) Carga da partícula	ABNT NBR 6567	Positiva	Positiva	Positiva	Positiva	N/A
e) Resíduo seco, % em massa, mín.	ABNT NBR 14376	62	62	62	64	55
f) Mistura com cimento, %	ABNT NBR 6297	N/A	N/A	N/A	4 máx.	N/A
Ensaio sobre o resíduo de emulsão obtido pela ABNT NBR 14896						
a) Penetração a 25 ºC, 100 g, 5 s, 0,1 mm	ABNT NBR 6576	60 a 80	85 mín.	85 mín.	40 a 150	40 a 150
b) Recuperação elástica a 25 ºC, 10 cm, % mín.	ABNT NBR 15086	N/A	N/A	50	N/A	N/A
N/A - não aplicável.						
As emulsões asfálticas contidas nesta Tabela devem ser formuladas para materiais específicos de cada obra.						

ANEXO XIX

(Artigo: “**IMPACTOS AMBIENTAIS DA PRODUÇÃO DE MATERIAIS ESTABILIZADOS COM EMULSÃO DE ASFALTO”** 26º Encontro Nacional de Conservação Rodoviária (ENACOR) 49ª Reunião Anual de Pavimentação (RAPv) - Aracaju/SE)



26º Encontro Nacional de Conservação Rodoviária (ENACOR)
49ª Reunião Anual de Pavimentação (RAPv)

IMPACTOS AMBIENTAIS DA PRODUÇÃO DE MATERIAIS ESTABILIZADOS COM EMULSÃO DE ASFALTO

Igor Sieczkowski Moreira[1]; Leonardo Lunkes Wagner[1]; Mônica Regina Garcez[1]; Gracieli Bordin Colpo[2] & Lélio Antônio Teixeira Brito[1]

RESUMO
Visando o uso de práticas sustentáveis, o material fresado de pavimento, ou RAP (*Reclaimed Asphalt Pavement*), pode ser reutilizado na produção de materiais estabilizados com emulsão de asfalto (*Bitumen Stabilized Materials* – BSM), possibilitando seu retorno à rodovia. A BSM vem ganhando espaço no Brasil e auxilia na redução da pegada ambiental por ser um material de aplicação a frio e com possibilidade de incorporação de elevados valores de RAP. Este trabalho objetiva quantificar os impactos ambientais oriundos da produção de BSM, a partir de uma análise de ciclo de vida, visando identificar oportunidades de melhoria do desempenho ambiental de seu processo produtivo. Para tanto, utilizou-se o software OpenLCA e a base de dados Ecoinvent 3.7.1, estando o escopo restrito aos módulos A1, A2 e A3, correspondente à fase de produção dos materiais, conforme proposto pela norma ISO 21930 (2017). O método utilizado foi o ReCiPe *endpoint* (H, A), cujos indicadores apresentam os impactos ambientais agregados nas categorias de saúde humana, biodiversidade e escassez de recursos. Os resultados demonstraram que o esgotamento de combustíveis fósseis, devido majoritariamente ao transporte de materiais, é o principal impacto ambiental da BSM analisada. Assim, verifica-se também que os impactos estão diretamente relacionados à emissão de CO_2. Portanto, uma oportunidade de melhorar o desempenho ambiental da produção de BSM é a alternância para combustíveis oriundos de fontes renováveis, utilização de bioligantes ou a substituição da frota de veículos antigos por novos menos poluentes.

PALAVRAS-CHAVE: ESG; Materiais estabilizados; Reciclagem de pavimentos; Transporte de materiais; Fresado.

ABSTRACT
Aimed at sustainable practices, Reclaimed Asphalt Pavement (RAP), can be reused in the production of Bitumen Stabilized Materials (BSM), enabling its return to the highway. BSM is gaining ground in Brazil and assists in reducing the environmental footprint as it is a cold-applied material with the potential to incorporate high amounts of RAP. This study aims to quantify the environmental impacts arising from the production of BSM through a life cycle analysis, seeking to identify opportunities to improve the environmental performance of its production process. For this purpose, the OpenLCA software and the Ecoinvent 3.7.1 database were used, with the scope limited to modules A1, A2, and A3, corresponding to the production phase of the materials, as proposed by the ISO 21930 (2017) standard. The method used was ReCiPe endpoint (H, A), whose indicators show the aggregated environmental impacts in the categories of human health, biodiversity, and resource scarcity. The results demonstrated that the depletion of fossil fuels, primarily due to material transportation, is the main environmental impact of the analyzed BSM. Thus, it is also evident that the impacts are directly related to CO_2 emissions. Therefore, an opportunity to improve the environmental performance of BSM production is switch to fuels from renewable sources, the use of bio-binders, or the replacement of old vehicles with newer, less polluting ones.

KEY WORDS: ESG; Stabilized materials; Pavement recycling; Material transportation; RAP.

[1] **Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, e-mail: igor.moreira@ufrgs.br; leonardo.lunkes@ufrgs.br; monica.garcez@ufrgs.br; lelio.brito@ufrgs.br**
[2] **Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul – PUCRS, e-mail: gracieli.colpo@pucrs.br**

INTRODUÇÃO

Uma das principais técnicas de recuperação de pavimentos envolve a fresagem do revestimento asfáltico em conjunto com parte da base, também conhecido como *Full Depth Reclamation* (FDR). O material fresado é denominado no inglês de *Reclaimed Asphalt Pavement* (RAP), e consiste no resíduo da camada superficial de concreto asfáltico (CA). Frequentemente o RAP é descartado em local de aterro temporário, não sendo ideal do ponto de vista ambiental por diversas questões, inclusive pelo aumento de transporte necessário para seu posterior processamento.

No Brasil, o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT), por meio da resolução nº14/2021 (DNIT, 2021), dispõe que todos os projetos de engenharia de restauração, adequação de capacidade e ampliação de obras viárias deverão incluir o reaproveitamento do RAP eventualmente produzido no empreendimento, podendo este ser aplicado nas camadas do pavimento a serem construídas ou na execução de novos concretos asfálticos.

Segundo Dias *et al.* (2023), a pesquisa e aplicação de camadas de base compostas por materiais asfálticos reciclados, estabilizados com emulsão asfáltica, tem sido explorada em diversas configurações no Rio Grande do Sul. Tais misturas são internacionalmente conhecidas como *Bitumen Stabilized Materials* (BSM).

Moreira, Correia e Pereira (2006) afirmam a existência de estudos recentes demostrando que técnicas de reciclagem a frio, como a BSM, se mostram vantajosas no ponto de vista de economia de energia e proteção ambiental. Porém, a técnica de materiais estabilizados por asfalto, como o próprio nome já diz, é composta por materiais derivados do petróleo, além da possível adição, por exemplo, de cimento Portland. Sendo assim, mesmo que este material seja frequentemente relacionado à redução de impactos ambientais, o seu processo produtivo não é isento de danos ambientais, havendo necessidade de sua avaliação.

Neste contexto, este trabalho possui o objetivo de quantificar os impactos ambientais associados à produção de uma BSM composta por RAP, emulsão asfáltica e adição de agregados virgens e cimento Portland, a partir de uma análise de ciclo de vida (ACV), bem como identificar oportunidades para a melhoria do desempenho ambiental da produção de BSM com agregados provenientes das obras de restauração de rodovias.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O processo de estabilização de uma BSM ocorre quando a espuma de asfalto, ou emulsão asfáltica, é misturada com agregados virgens e/ou RAP (SABITA, 2020). Além do agente estabilizador, pode-se adicionar um filler ativo, como cal ou cimento. Materiais estabilizados por asfalto podem ser utilizados para a execução de pavimentos novos ou reabilitação de pavimentos antigos, e a estabilização pode ser realizada *in situ* ou em usina. No processo de reabilitação, comumente são utilizadas as técnicas de reciclagem profunda ou *overlay*.

Durante o processo executivo, a eficiência da compactação da BSM é dependente de seu teor de umidade. Grilli *et al.* (2014) demonstram que, em uma BSM composta por altos teores de umidade, inicialmente a água funciona como um lubrificante e permite a compactação efetiva. Porém, quando a energia absorvida pela pressão d'água torna-se dominante, há a diminuição da trabalhabilidade da mistura, fazendo com que a compactação perca seu efeito no intertravamento do esqueleto sólido. Por outro lado, o teor ótimo de umidade permite a obtenção do valor mínimo de volume de agregados, atingindo a saturação somente ao final do processo de compactação.

Um dos principais guias sobre BSM é o TG2 - *Technical Guideline: Bitumen Stabilised Materials*, da República da África do Sul (SABITA, 2020). O guia indica que a BSM apresenta características como significativa coesão, resistência à flexão pelo ligante disperso na mistura, baixa propensão ao trincamento quando submetido à tração, boa sensibilidade à umidade e durabilidade.

A busca por materiais inovadores, ambientalmente amigáveis e capazes de atender às demandas impostas, é essencial para garantir a qualidade dos pavimentos e o desenvolvimento sustentável. A reutilização de materiais de pavimentação, que seriam descartados ou subutilizados, está ganhando destaque nas pesquisas e nas demandas das construtoras de pavimentos rodoviários por meio de técnicas de reciclagem.

O RAP, conhecido no Brasil como fresado, é um material obtido na remoção de uma ou mais camadas do pavimento, por meio de um processo denominado de fresagem. Este material vem ganhando espaço nos processos de recuperação de pavimentos, pois apresenta uma boa granulometria e um percentual de ligante já incorporado. Em um passado recente, o fresado era descartado ou doado para prefeituras ou vizinhos de obras, pois não havia demanda para seu reaproveitamento.

A reciclagem consiste em uma técnica de reabilitação de rodovias que busca a reutilização de materiais já envelhecidos, incorporando-os em misturas com novos agregados, cimento, cal ou outros aditivos químicos (FEDRIGO, 2015; BERNUCCI *et al.*, 2022). Além disso, a execução da reciclagem pode ocorrer em campo ou em usinas, onde há um maior controle dos materiais e maior qualidade de mistura, embora exija o transporte do material até a usina (SABITA, 2020). A incorporação do fresado pode ser feita a quente ou a frio.

A utilização de agregados deve respeitar as propriedades necessárias para o tratamento bem-sucedido com o material asfáltico, incluindo características de durabilidade do agregado natural (não tratado), resistência (dureza), plasticidade, classificação, composição e características de intemperismo (SABITA, 2020).

Assim como os agregados virgens, o RAP deve ser classificado e estudado para compor a mistura de BSM. Preti *et al.* (2019) destacam que o RILEM TC237-SIB é o único protocolo de caracterização de RAP existente. O teste de coesão, desenvolvido no documento, funciona adequadamente como uma ferramenta para classificar e distinguir os diferentes tipos de RAP (PERRATON *et al.,* 2016; PRETI *et al.,* 2019). Referente especialmente à granulometria, encontra-se o dilema de se o RAP deve ser considerado como "*black rock*" (agregado negro) ou como sua granulometria original, após a extração do ligante asfáltico.

O método sul-africano de projeto de mistura trata o RAP como um agregado negro e não considera a contribuição do ligante asfáltico envelhecido na composição. Por outro lado, o procedimento de projeto de mistura, desenvolvido nos Estados Unidos, apresenta o RAP com maior porcentagem de agregados revestidos com ligante, pois seus pavimentos possuem maiores espessuras de camada betuminosa (CHANDRA, VEERARAGAVAN e KRISHNAN, 2013). Os manuais da ARRA (ARRA, 2016, 2017, 2018), bem como o Manual da Wirtgen (WIRTGEN GROUP, 2012) e o livro Pavimento Sustentável (BONFIM, 2021), consideram o RAP com sua granulometria não extraída, ou seja, como *black rock*.

Algumas agências consideram a contribuição do ligante envelhecido presente no RAP, mas a maioria trata o RAP da mesma forma que um agregado natural ou rocha negra, ou seja, o ligante é considerado inerte devido às baixas temperaturas de produção (MONDAL e KUNA, 2022). Contudo, a reativação das características aglutinantes do ligante presente no RAP pode ser obtida a

partir do aumento de temperatura, tanto dos agregados virgens, quanto do próprio RAP, e do aumento do tempo de mistura (MADRIGAL *et al*., 2017).

Com relação ao aditivo de filler ativo, diferentes tipos podem ser utilizados em materiais estabilizados por ligantes, como cimentos (não recomendado os de cura rápida), cal hidratada, cinza volante e escória de alto forno, sendo apenas alguns dos principais exemplos. Conforme o TG2 (SABITA, 2020), o objetivo de incorporar o filler ativo na BSM é melhorar a aderência do asfalto ao agregado, melhorar a dispersão da emulsão, reduzir o índice de plasticidade dos materiais naturais, aumentar a rigidez da mistura e a taxa de ganho de resistência, acelerar a cura da mistura compactada e auxiliar na ruptura da emulsão.

Porém, o comportamento de materiais estabilizados com ligante varia significativamente dependendo da qualidade do material não tratado e da quantidade de asfalto e carga ativa aplicada. Assim, a quantidade de cimento Portland deve ser limitada para evitar a diminuição da flexibilidade das misturas (YAN *et al.*, 2017). Quando a adição é excessiva, o material se comporta mais como material tratado com cimento Portland e o benefício da adição de emulsão asfáltica é discutível. Por esta razão, essa adição é limitada a 1% em massa (BONFIM, 2021; SABITA, 2020; WIRTGEN GROUP, 2012).

Meneses, Vasconcelos e Bernucci (2022) demonstram que o tipo de filler, mesmo em pequenas porcentagens (1%), afeta o comportamento mecânico de misturas de asfalto reciclado a frio. A adição de um baixo teor de cimento Portland ou cal hidratada produz um comportamento semelhante ao de um material granular, com rigidez dependente do estado de tensões. Em níveis baixos de adição, a cal apresenta melhor desempenho em termos de aumento da rigidez e menor dependência da tensão confinante.

Com o cimento Portland dosado em baixas quantidades, os produtos de hidratação se dispersam no interior dos filmes de ligante asfáltico, aumentando a viscosidade da mistura e melhorando a resistência às deformações permanentes (GRAZIANI *et al.*, 2016). Com o aumento do teor de cimento Portland, a estabilidade à umidade, a estabilidade em alta temperatura e a resistência das misturas recicladas à frio aumentam, enquanto a resistência à fissuração em baixa temperatura inicialmente aumenta e depois reduz (YAN *et al.*, 2017).

Os mecanismos de cura não ocorrem imediatamente após a compactação, mas são graduais e podem levar semanas ou meses. Por exemplo, a taxa de quebra da emulsão asfáltica depende do tipo e conteúdo do emulsificante, do valor do pH dentro da mistura e da presença de partículas finas (ou seja, carga ou cimento Portland). Por outro lado, a taxa de perda de umidade está estritamente relacionada às condições de contorno das camadas recicladas, como temperatura e umidade relativa. Além disso, como as reações de hidratação do cimento Portland requerem a presença de água, o uso de cimento acelera o processo de cura da emulsão asfáltica por reduzir a quantidade de água livre (GRAZIANI *et al.*, 2016).

ANÁLISE DO CICLO DE VIDA

A estrutura metodológica aplicada neste estudo segue os requisitos para uma análise do ciclo de vida, conforme proposto pela norma técnica NBR ISO 14040 (ABNT, 2009). De acordo com a referida norma, a ACV enfoca os aspectos ambientais e os impactos ambientais potenciais (por exemplo, uso de recursos e as consequências de liberações para o meio ambiente) ao longo de todo o ciclo de vida de um produto, desde a aquisição das matérias-primas, produção, uso, tratamento pós-uso, reciclagem até a disposição final.

Um estudo de ACV é composto pela definição do objetivo e escopo, análise de inventário, avaliação dos impactos e interpretação dos resultados.
Para a realização da modelagem de análise de ciclo de vida e a obtenção dos impactos ambientais causados pela produção de BSM, utilizou-se o *software* de acesso livre openLCA v.2.0.3 em conjunto com a base de dados Ecoinvent 3.7.1. A **Erro! Fonte de referência não encontrada.** representa esquematicamente o cenário modelado, contendo os cinco fluxos de saída escolhidos no programa. Os fluxos 1 a 4 são equivalentes à produção dos materiais utilizados na mistura, enquanto o fluxo "X" equivale à mistura dos quatro produtos anteriores, resultando na BSM.

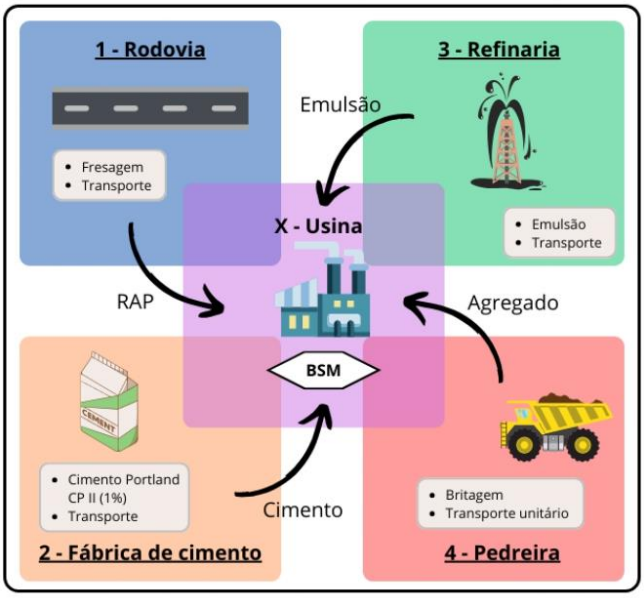


Figura 1. Esquema do fluxo de produção da BSM (AUTORES, 2024).

Escopo

Conforme os requisitos da NBR ISO 14040 (ABNT, 2009), e seguindo os fluxos designados pela ISO 21930 (2017), o escopo para estudo foi assim definido:

- Unidade declarada: 100 toneladas de BSM;
- Fronteiras do sistema: análise do berço ao portão (*cradle-to-gate*) com os módulos mandatórios para uma declaração ambiental de produto (DAP), conforme sugerido pela ISO 21930 (2017):
  - Materiais (A1): faz referência a extração e produção das matérias-primas;
  - Transporte (A2): indica o transporte destas matérias-primas até a usina;
  - Produção (A3): considera a energia despendida para a mistura das matérias-primas, dando origem ao produto BSM;



- Procedimentos de alocação: alocação de recursos em massa;
- Tipos de impactos avaliados: método ReCiPe *Endpoint* (H, A);
- Fonte de dados:
    - *Foreground*: traço das misturas, energia de equipamentos na usina e em campo e distâncias de transporte;
    - *Background*: base de dados Ecoinvent.

Construção do inventário

A ISO 21930 (2017) apresenta de forma esquemática as etapas genéricas do ciclo de vida de uma estrutura de pavimento. Neste estudo, o escopo foi delimitado nos módulos A1, A2 e A3, correspondentes a fase de produção dos materiais, mandatória para a publicação das DAP.
O módulo da matéria-prima (A1) corresponde à produção do RAP, cimento Portland, emulsão asfáltica e agregados; o módulo do transporte (A2) corresponde às distâncias percorridas pelas matérias-primas até a usina (campo-usina, refinaria-usina, fábrica de cimento-usina e pedreira-usina); e o módulo de produção (A3) corresponde à operação da usina para a produção da mistura de BSM.
As discriminações dos processos utilizados em cada fluxo de saída, bem como as quantidades, unidades e itens da base de dados, estão apresentados na Tabela 1.
O valor de consumo energético da operação de fresagem, constante na Tabela 1, foi calculado com base nas informações fornecidas pelo DNIT através do Sistema de Custos Referenciais de Obras (SICRO). A composição escolhida possui o código 4011479, denominada de "fresagem contínua de revestimento asfáltico", referente ao estado do Rio Grande do Sul para o mês de abril de 2023.
Quanto a energia para mistura da emulsão e da BSM, ambas foram calculadas com base em informações fornecidas por empresas brasileiras.
A quantidade de material foi calculada para a produção de 100 toneladas de BSM, cujo traço foi adaptado da pesquisa de Dias *et al.* (2023), dimensionado conforme metodologia TG2 para um pavimento brasileiro, e é composto de 43% de agregado virgem, 54% de RAP, 1% de cimento Portland e 2% de emulsão asfáltica (60% de ligante asfáltico e 40% de água).
No cenário modelado, considerou-se que a rodovia submetida ao processo de recomposição está localizada no estado do Rio Grande do Sul. Para o cálculo das distâncias de transporte foram consideradas as principais empresas fornecedoras de materiais da região. Tomando como referência a usina da BSM, as distâncias consideradas até o campo (rodovia), fábrica de cimento Portland e distribuidora de emulsão asfáltica, são respectivamente de 50 km, 250 km e 280 km.
O cálculo da distância percorrida pela fresadora foi baseado em sua capacidade de fresagem. Um equipamento comumente utilizado em obras de reabilitação é capaz de realizar a fresagem de uma faixa de 1,00 m de largura e 20 cm de profundidade. Assim, é possível calcular o volume fresado em função da distância percorrida. O volume pode ser convertido para peso a partir do peso específico do RAP, equivalente a 2069 kg/m³. Por fim, para o transporte da fresadora, admitiu-se um peso de 14 toneladas.

Tabela 1. Descrição dos fluxos de produção da BSM (AUTORES, 2024).

Fluxo de saída	Fluxo de entrada	Qnt.	Un.	Módulo	Ecoinvent
RAP	Energia de fresagem	155,69	kWh	A1	Diesel, burned in building machine | diesel, burned in building machine | cut-off, U – GLO.
	Distância percorrida pela fresadora	3,51	t.km	A1	Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 | transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 | Cutoff, U – RoW.
	Transporte da fresadora (usina-campo + campo-usina)	1400	t.km	A2	Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 | transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 | Cutoff, U – RoW.
	Transporte do material fresado (campo-usina)	2700	t.km	A2	Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 | transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 | Cutoff, U – RoW.
Cimento	Cimento CP II	1,00	t	A1	Cement, limestone 6-10% | cement production, limestone 6-10% | cement limestone 6-10% | Cut-off U – BR
	Transporte (fábrica-usina)	250	t.km	A2	Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 | transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 | Cutoff, U – RoW.
Emulsão	Ligante asfáltico	2,00	t	A1	Pitch production, petroleum refinery operation | pitch | Cutoff, U – BR.
	Água	1,33	t	A1	Tap water | tap water production, conventional treatment | tap water | Cut-off U-BR.
	Energia para mistura	8,21	kWh	A3	Electricity voltage transformation from high to medium voltage | electricity, medium voltage | Cutoff, U - BR-Southern grid.
	Transporte (refinaria-usina)	933,33	t.km	A2	Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 | transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 | Cutoff, U – RoW.
Agregado	Britagem	43,00	t	A1	Gravel, crushed | gravel production, crushed | gravel crushed | Cutoff U – BR
	Transporte unitário dentro da usina	43,00	t.km	A2	Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 | transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 | Cutoff, U – RoW.
BSM	RAP	54,00	t	A1	Fluxo de saída – RAP.
	Cimento	1,00	t	A1	Fluxo de saída – Cimento.
	Emulsão	2,00	t	A1	Fluxo de saída – Emulsão.
	Agregado	43,00	t	A1	Fluxo de saída – Agregado.
	Energia para mistura	43,76	kWh	A3	Electricity voltage transformation from high to medium voltage | electricity, medium voltage | Cutoff, U - BR-Southern grid.



Avaliação dos Impactos

Para a avaliação dos impactos ambientais, utilizou-se o método ReCiPe *endpoint* (H, A), desenvolvido pelo *National Institute for Public Health and Environment* (HUIJBREGTS *et al.,* 2017). O ReCiPe possui fatores de caracterização nos níveis *midpoint* e *endpoint*. No *midpoint*, os fatores de caracterização estão alocados entre a causa e o impacto observado, normalmente no ponto em que o mecanismo ambiental é idêntico para cada fluxo ambiental atribuído a essa categoria de impacto (GOEDKOOP *et al.*, 2009). Os fatores de caracterização do *endpoint* refletem impactos nas três principais áreas de proteção: saúde humana, qualidade do ecossistema e escassez de recursos (HAUSCHILD e HUIJBREGTS, 2015).

Cada nível do ReCiPe pode ser avaliado a partir de três perspectivas culturais diferentes: *Individualist* (I), *Hierarchist* (H) e *Egalitarian* (E). A primeira visa o curto prazo, é otimista em relação à tecnologia, valoriza a iniciativa individual do mercado e considera a natureza como resiliente. A segunda considera a natureza como parcialmente tolerante, sendo um modelo de consenso comumente encontrado em estudos científicos. A terceira perspectiva trabalha no longo prazo, visa as necessidades do grupo acima das individuais e considera a natureza como frágil (HUIJBREGTS *et al.,* 2017).

Neste trabalho optou-se pelo nível *endpoint* sob a perspectiva hierarquista média (H, A). Esta escolha foi feita em função de os resultados do *endpoint* serem expressos nas três principais áreas de proteção, de modo a facilitar o entendimento dos fatores de impacto do produto analisado. Ademais, a visão hierarquista foi escolhida por ser um consenso na comunidade científica.

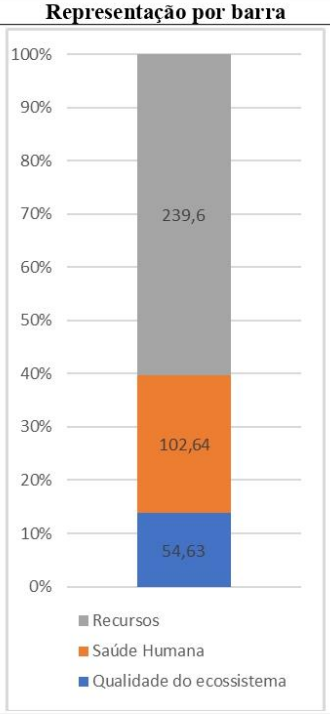
No *endpoint*, a saúde humana é avaliada em anos de vida ajustados por incapacidade, equivalente a anos perdidos ou que uma pessoa está incapacitada devido a doenças ou acidentes; para a qualidade do ecossistema, a unidade utilizada é a perda local de espécies integrada ao longo do tempo (ano-espécie); para a escassez de recursos a unidade é o dólar, representante do custo adicional envolvido na extração futura de recursos fósseis e minerais.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Tabela 2 consta a pontuação de impactos ambientais, para cada categoria, obtida a partir da análise de *endpoint* (H, A). A representação dos impactos por barras acumuladas, por grupo analisado, indica que o grupo mais impactado são os recursos naturais, seguido pela saúde humana e qualidade do ecossistema.

A categoria de recursos naturais engloba os recursos fósseis e minerais, os quais provocam impactos no aumento do custo de extração e custo de energia do óleo/gás/carvão (HUIJBREGTS *et al.,* 2017). Conforme os dados apresentados na Tabela 2, 94% do dano nos recursos naturais é provocado pelo esgotamento de recursos fósseis. Esse resultado é esperado, visto que a maioria das atividades realizadas (transporte, mistura e fresagem) utilizam combustível fóssil como fonte de energia.

Tabela 2. Impactos por categoria - ReCiPe *Endpoint* (AUTORES, 2024).

Grupo	Categoria de impacto	Pontuação	Representação por barra
Qualidade do ecossistema	Ocupação de terras agrícolas	2,08	
	Mudanças climáticas, ecossistemas	41,63	
	Ecotoxicidade de água doce	0,01	
	Eutrofização de água doce	0,01	
	Ecotoxicidade marinha	0,00	
	Transformação natural de terras	7,61	
	Acidificação terrestre	0,20	
	Ecotoxicidade terrestre	0,17	
	Ocupação urbana de terras	2,91	
	Total	**54,63**	
Saúde humana	Mudanças climáticas, saúde humana	65,87	
	Toxicidade humana	5,09	
	Radiação ionizante	0,11	
	Depleção de ozônio	0,05	
	Formação de material particulado	31,29	
	Formação de oxidante fotoquímico	0,23	
	Total	**102,64**	
Recursos	Esgotamento de combustíveis fósseis	225,21	
	Esgotamento de metais	14,39	
	Total	**239,60**	
	Total geral	396,86	

A categoria de saúde humana é composta pelos impactos de material particulado, formação/esgotamento da camada de ozônio, radiação ionizante, toxicidade humana, aquecimento global e uso d'água, que são agregados em termos de aumento de doenças respiratórias, câncer, desnutrição e outras doenças (HUIJBREGTS *et al.,* 2017). Neste estudo, os indicadores mais afetados foram os de mudanças climáticas e formação de materiais particulados. Ambos relacionados direta ou indiretamente com a emissão de CO_2 a partir da queima de combustíveis fósseis.

A categoria de qualidade do ecossistema é formada pelos impactos de aquecimento global, uso d'água, ecotoxicidade/eutrofização d'água doce e marinha, formação da camada de ozônio, ecotoxicidade/acidificação terrestre, uso/transformação da terra, agregados em termos de dano a espécies de água doce, marinha e terrestre (HUIJBREGTS *et al.,* 2017). Para a produção da BSM em análise, conforme apresentado na Tabela 2, os indicadores de maior impacto nesta categoria são as mudanças climáticas e a transformação natural de terras. Novamente, as mudanças climáticas estão ligadas à emissão de CO_2. Com relação aos impactos de transformação, estes são provenientes da exploração de pedreiras e petróleo.

Conforme visto, a produção de gás carbônico está presente de diversas formas nos fluxos considerados para a produção da BSM. De acordo com a Tabela 1, existem seis atividades de

transporte, cujo principal meio de poluição é a queima de diesel; para a produção do RAP há também a queima do diesel para o funcionamento da máquina fresadora; para o cimento, existe a emissão de CO_2 pela queima do material no processo produtivo; e para a emulsão, na produção do ligante asfáltico, há a emissão de CO_2 pela operação da refinaria de petróleo. Em todos estes casos há o esgotamento de recursos naturais, visto que o diesel e o ligante asfáltico são subprodutos do petróleo.

A Tabela 3 apresenta as quantidades de gás carbônico, em massa, geradas por categoria, conforme os resultados da simulação realizada neste estudo.

Tabela 3. Emissão de gás carbônico por categoria (AUTORES, 2024).

Fonte de emissão	CO_2 (kg)	Porcentagem
Biogenética	89,78	3,8%
Fóssil	2250,29	95,8%
Transformação de terras	6,28	0,3%
Estoque de solo ou biomassa	1,43	0,1%
Total	2347,77	100%

A Tabela 3 corrobora o fato de os combustíveis fósseis serem um ponto crítico da BSM sob o ponto de vista ambiental. Essa fonte corresponde a 95,8% do total no processo produtivo do material. De acordo com as análises anteriores, o transporte de materiais é o modo mais frequente de combustão de recursos fósseis. Sendo assim, identifica-se o transporte de materiais como a principal fonte emissora de CO_2 e principal meio gerador de impactos ambientais na produção da BSM analisada.

Souza (2017) apresentou uma ACV para a avaliação da construção de pavimentos convencionais. Seus resultados ressaltaram que o transporte também desempenha um papel significativo nas emissões, corroborando com os resultados obtidos nesta pesquisa.

Para facilitar o entendimento das dimensões das emissões do produto, os resultados foram comparados com as emissões de veículos brasileiros. Um carro produz em média 191,4 g de CO_2 por km percorrido (CARVALHO *et al*., 2017). A produção de 100 toneladas de BSM gera uma emissão total de 2347,77 kg de CO_2. Assim, seria necessário que um veículo de passeio percorresse 12.266 km para equiparar as emissões de carbono com o processo produtivo de 100 toneladas deste material.

CONCLUSÕES

É importante salientar que uma análise de ciclo de vida é sensível ao contexto. Portanto, as conclusões obtidas são restritas ao cenário analisado, não sendo possível fazer generalizações, devido principalmente às distâncias de transporte específicas para cada região.

Os resultados demonstram que o esgotamento de combustíveis fósseis é o principal impacto ambiental do processo produtivo da BSM analisada. Dentre as diferentes fontes, identificou-se o transporte de materiais como o principal meio para a exaustão deste recurso. Ademais, a queima de combustíveis resulta na emissão de gás carbônico, levando à conclusão de que este é um dos fatores chave na análise de impactos ambientais da BSM.

Assim, as longas distâncias de transporte, presentes no cenário modelado, são decisivas para os resultados observados. Porém, vale ressaltar que este é um cenário comum no dia a dia, visto que em muitos casos a rodovia a ser recuperada está distante da usina de BSM, fábrica de cimento e

refinaria de emulsão. Um cenário ideal seria composto por um ambiente em que a usina, fábrica e refinaria estejam localizadas no mesmo lugar, havendo a necessidade apenas de transporte até o local de aplicação do material. Porém, entende-se que a configuração de locação destes pontos é uma condição pré-estabelecida, havendo dificuldades técnicas e operacionais para alteração. Portanto, como solução para mitigar os impactos ambientais, pode-se avaliar qual dos componentes da mistura de BSM apresentam maior momento de transporte para uma tentativa de otimização da dosagem da BSM, visando diminuir o impacto causado pelo transporte. Além disto, possíveis alternativas de longo prazo são a alternância para combustíveis oriundos de fontes renováveis, utilização de bioligantes ou a substituição da frota de veículos antigos por novos, menos poluentes. A simulação considerou veículos que seguem a norma Euro 5 de limite máximo de emissão de poluentes veiculares. Porém, sabe-se que já existem veículos no padrão Euro 6, com critérios de emissão ainda mais rigorosos e menos poluentes.

Como sugestão de trabalhos futuros, novos cenários podem ser avaliados, com enfoque em simular diferentes distâncias, visando quantificar a parcela de impacto do transporte, diferentes traços de BSM, procurando conciliar desempenho e proteção ambiental, e diferentes configurações de veículo, de forma a explorar a viabilidade da alteração da frota veicular. Além disso, é possível realizar simulações no nível *midpoint*, visando obter resultados quantitativos dos diversos poluentes envolvidos no processo.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq pela concessão das bolsas de estudo e produtividade respectivamente ao primeiro autor e à terceira autora, à CAPES pela bolsa de estudo do segundo autor, bem como ao Laboratório de Pavimentação da UFRGS, que permitiu a execução do estudo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR ISO 14040: Gestão ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Princípios e estrutura. Rio de Janeiro, 2009.

ARRA. Recommended Mix Design Guidelines for Full Depth Reclamation (FDR) Using Cement or Cement Kiln Dust (CKD) Stabilizing Agent FDR202. v. 60137, n. 630, 2016.

ARRA. Recommended Mix Design Guidelines for Cold Recycling Using Foamed (Expanded) Asphalt Recycling Agent (CR202). Asphalt Recycling & Reclaiming Association, v. 60137, n. 630, 2017.

ARRA. Recommended Mix Design Guidelines for Full Depth Reclamation (FDR) Using Emulsified Asphalt Stabilizing Agent FDR201A. v. 60137, n. 630, 2018.

BERNUCCI, L.B. et al. Pavimentação Asfáltica: Formação Básica para Engenheiros. 2ª ed. Rio de Janeiro: PETROBRAS: ABEDA, 2022.

BONFIM, V. Pavimento Sustentável. São Paulo: Exceção Editorial, 2021.

CARVALHO, A.L. et al. Diagnóstico das Emissões de CO2 a Partir dos Deslocamentos dos Estudantes da Universidade de Brasília. Revista Científica de Pesquisa Aplicada à Engenharia. 2017.

CHANDRA, R.; VEERARAGAVAN, A.; KRISHNAN, J.M. Evaluation of Mix Design Methods for Reclaimed Asphalt Pavement Mixes with Foamed Bitumen. Procedia - Social and Behavioral Sciences, v. 104, p. 2–11, dez. 2013.

DNIT – DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. Resolução nº 14/2021, de 08 de julho de 2021. Dispõe sobre o reaproveitamento do RAP (Reclaimed Asphalt Pavement) nas obras de restauração,

adequação de capacidade e ampliação do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes – DNIT. Brasília/DF, 2021.

DIAS, C.R.C. et al. Bitumen Stabilized Materials as Pavement Overlay: Laboratory and Field Study. Construction and Building Materials, v. 369, 2023. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.130562.

FEDRIGO, W. Reciclagem de Pavimentos com Adição de Cimento Portland: Definição das Bases Para um Método de Dosagem. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2015.

GOEDKOOP, M. et al. ReCiPe 2008: A Life Cycle Impact Assessment Method Which Comprises Harmonised Category Indicators at The Midpoint and Endpoint Levels. 1ª ed. Report i: characterization. The Netherlands: Ruimte en Milieu, Ministerie van Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening en Milieubeheer, 2009.

GRAZIANI, A. et al. Effect of Curing on The Physical and Mechanical Properties of Cold-Recycled Bituminous Mixtures. Materials and Design, v. 95, p. 358–369, 2016.

GRILLI, A. et al. Análise Volumétrica de Misturas Asfálticas Recicladas a Frio Por Meio de Compactador Giratório. 21º Encontro de Asfalto. Rio de Janeiro, Brasil. 2014.

HAUSCHILD, M.Z.; HUIJBREGTS, M.A.J. Introducing Life Cycle Impact Assessment. In: Life Cycle Impact Assessment. Springer, 2015.

HUIJBREGTS, M.A.J. et al. ReCiPe2016: A Harmonised Life Cycle Impact Assessment Method at Midpoint and Endpoint Level. In: Life Cycle Assess 22, p. 138–147. 2017. https://doi.org/10.1007/s11367-016-1246-y.

ISO – INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 21930: Sustainability in Building Construction – Environmental Declaration of Building Products. Geneva, 2017.

MADRIGAL, D.P. et al. Effect of Mixing Time and Temperature on Cracking Resistance of Bituminous Mixtures Containing Reclaimed Asphalt Pavement Material. Journal of Materials in Civil Engineering. 2017. https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001831.

MENESES, J.P.C; VASCONCELOS, K.; BERNUCCI, L.L.B. Stiffness Assessment of Cold Recycled Asphalt Mixtures – Aspects Related to Filler Type, Stress State, Viscoelasticity, and Suction. Construction and Building Materials, v. 318, 2022. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.126003.

MONDAL, P.G.; KUNA, K.K. Mix Design Considerations for Foamed Bitumen Stabilized Materials: A Review. Construction and Building Materials, v. 326, fev., p. 126783, 2022.

MOREIRA, J., CORREIA, A.G.; PEREIRA, P.A. Contribuição Para a Reutilização de Material Fresado em Camadas Estruturais de Pavimento, 2006.

PERRATON, D. et al. Tests Campaign Analysis to Evaluate the Capability of Fragmentation Test to Characterize Recycled Asphalt Pavement (RAP) Material. In 8th RILEM international Symposium on Testing and Characterization of Sustainable and Innovative Bituminous Materials. p. 965–976. Dordrecht: Springer. 2016.

PRETI, F. et al. Application and Validation of The Cohesion Test to Characterize Reclaimed Asphalt Pavement. Road Materials and Pavement Design, 20(sup1), S434–S445. 2019.

SABITA. Technical Guideline (TG2): Bitumen Stabilised Materials Southern African Bitumen Association (Sabita). 3ª ed. 2020.

WIRTGEN GROUP. Reciclagem a Frio: Tecnologia de Reciclagem a Frio Wirtgen. 2012. Disponível em: <www.wirtgen.com>. Acesso em: abr. 2024.

YAN, J. et al. Early-Age Strength and Long-Term Performance of Asphalt Emulsion Cold Recycled Mixes With Various Cement Contents. Construction and Building Materials, v. 137, p. 153–159, 2017.

SOUZA, L. P. Uso Integrado das Ferramentas de Análise do Ciclo de Vida e de Análise do Custo do Ciclo de Vida em Pavimentação. 2017. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Engenharia de Transportes, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2017.

ANEXO XX

(Apresentação artigo: “**IMPACTOS AMBIENTAIS DA PRODUÇÃO DE MATERIAIS ESTABILIZADOS COM EMULSÃO DE ASFALTO”** 26º Encontro Nacional de Conservação Rodoviária (ENACOR) 49ª Reunião Anual de Pavimentação (RAPv) - Aracaju/SE)

IMPACTOS AMBIENTAIS DA PRODUÇÃO DE MATERIAIS ESTABILIZADOS COM EMULSÃO DE ASFALTO

Igor Sieczkowski Moreira
Universidade Federal do Rio Grande do Sul/Mestrando

INTRODUÇÃO
RECUPERAÇÃO DE PAVIMENTOS



Fonte: https://www.sonoticias.com.br/geral/rodovia-asfalto-ruim-br-163-maio-2017-divulgacao/

Recuperação → Fresado (RAP) → DNIT nº14/2021

INTRODUÇÃO
BITUMEN STABILIZED MATERIALS



Composição

- Fresado
- Agregado virgem
- Ligante
- Água
- Filler

Ligante + Água → Emulsão

Filler → Cimento, cal hidratada, cinza volante, escória de alto forno...

OBJETIVO
PRINCIPAL DA PESQUISA

Quantificar os impactos ambientais oriundos da produção de BSM, a partir de uma análise de ciclo de vida, visando identificar oportunidades de melhoria do desempenho ambiental de seu processo produtivo.

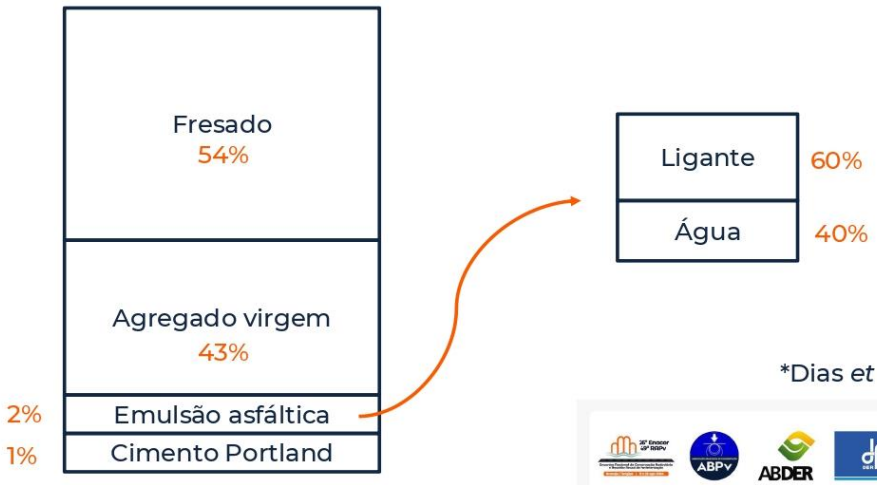
METODOLOGIA
ESCOPO E NORMA TÉCNICA

ISO 21930 (2017)

Produção			Construção		Uso							Fim de vida				Além das Fronteiras do Sistema
Matéria-prima	Transporte	Produção	Transporte	Construção	Uso	Manutenção	Reparo	Reabilitação	Reforma	Uso de energia	Uso de água	Demolição	Transporte	Processamento do resíduo	Descarte	Potencial reuso, recuperação e/ou reciclagem
A1	A2	A3	A4	A5	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	C1	C2	C3	C4	D
X	X	X	NI	NI	NI	NI	NI	NI	NI	NI	NI	NI	NI	NI	NI	NI

Mandatório para Declaração Ambiental de Produto (DAP)

METODOLOGIA
COMPOSIÇÃO DA BSM*



*Dias *et al.* (2023)

METODOLOGIA
OpenLCA V2.0.3: Ecoinvent 3.7.1

Midpoint → Fatores de caracterização entre a causa e o impacto observado
GOEDKOOP *et al.* (2009)

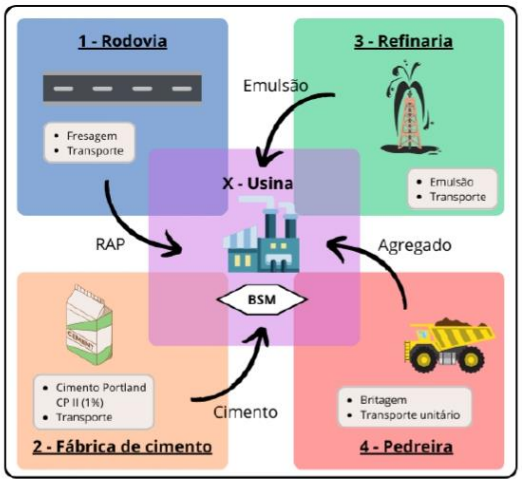
Endpoint → Fatores de caracterização nas três áreas de proteção: saúde humana, qualidade do ecossistema e escassez de recursos
HAUSCHILD e HUIJBREGTS (2015)

Individualist → Curto prazo, otimista e considera a natureza como resiliente
HUIJBREGTS *et al.* (2017)

Hierarchist → Natureza parcialmente tolerante. Consenso em estudos científicos
HUIJBREGTS *et al.* (2017)

Egalitarian → Longo prazo, visa necessidades do grupo e considera a natureza como frágil
HUIJBREGTS *et al.* (2017)

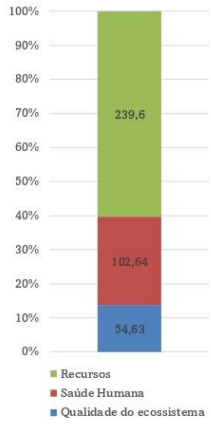
METODOLOGIA
FLUXO DE PRODUÇÃO DO MATERIAL



Transporte:
Usina-campo → 50 km
Usina-fábrica → 250 km
Usina-refinaria → 280 km

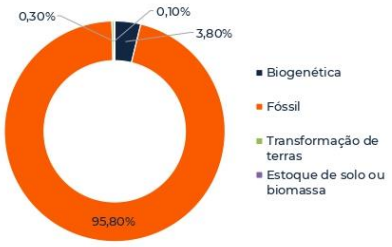
RESULTADOS
IMPACTOS POR CATEGORIA

Grupo	Categoria de impacto	Pontuação
Qualidade do ecossistema	Ocupação de terras agrícolas	2,08
	Mudanças climáticas, ecossistema	41,63
	Ecotoxicidade de água doce	0,01
	Eutrofização de água doce	0,01
	Ecotoxicidade marinha	0,00
	Transformação natural de terras	7,61
	Acidificação terrestre	0,20
	Ecotoxicidade terrestre	0,17
	Ocupação urbana de terras	2,91
	Total	**54,63**
Saúde humana	Mudanças climáticas, saúde humana	65,87
	Toxicidade humana	5,09
	Radiação ionizante	0,11
	Depleção de ozônio	0,05
	Formação de material particulado	31,29
	Formação de oxidante fotoquímico	0,23
	Total	**102,64**
Recursos	Esgotamento de combustíveis fósseis	225,21
	Esgotamento de metais	14,39
	Total	**239,60**
Total geral		**396,86**



RESULTADOS
EMISSÃO DE GÁS CARBÔNICO

Fonte de emissão	CO2 (kg)	Porcentagem
Biogenética	89,78	3,8%
Fóssil	2250,29	95,8%
Transformação de terras	6,28	0,3%
Estoque de solo ou biomassa	1,43	0,1%
Total	**2347,77**	**100%**



CONCLUSÕES

- Resultados sensíveis ao contexto;
- Principais fatores: esgotamento de combustíveis fósseis → transporte → gás carbônico;
- Mitigação:
  - Redução do momento de transporte/execução *in situ*;
  - Combustíveis de fontes renováveis;
  - Substituição da frota.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

DNIT – DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. Resolução nº 14/2021, de 08 de julho de 2021. Dispõe sobre o reaproveitamento do RAP (Reclaimed Asphalt Pavement) nas obras de restauração, adequação de capacidade e ampliação do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes – DNIT. Brasília/DF, 2021.

DIAS, C.R.C. et al. Bitumen Stabilized Materials as Pavement Overlay: Laboratory and Field Study. Construction and Building Materials, v. 369, 2023. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.130562.

GOEDKOOP, M. et al. ReCiPe 2008: A Life Cycle Impact Assessment Method Which Comprises Harmonised Category Indicators at The Midpoint and Endpoint Levels. 1ª ed. Report i: characterization. The Netherlands: Ruimte en Milieu, Ministerie van Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening en Milieubeheer, 2009.

HAUSCHILD, M.Z.; HUIJBREGTS, M.A.J. Introducing Life Cycle Impact Assessment. In: Life Cycle Impact Assessment. Springer, 2015.

HUIJBREGTS, M.A.J. et al. ReCiPe2016: A Harmonised Life Cycle Impact Assessment Method at Midpoint and Endpoint Level. In: Life Cycle Assess 22, p. 138–147. 2017. https://doi.org/10.1007/s11367-016-1246-y.

ISO – INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 21930: Sustainability in Building Construction – Environmental Declaration of Building Products. Geneva, 2017.

AGRADECIMENTOS

LAPAV

UFRGS
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

CAPES

PPGCI
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Construção e Infraestrutura

CNPq
Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico

ANTT
AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTES TERRESTRES



Igor Sieczkowski Moreira
UFRGS/Mestrando
Igor.moreira@ufrgs.br

LAPAV
UFRGS
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

Av. Bento Gonçalves, 9500 – Agronomia – Porto Alegre-RS
www.ufrgs.br/lapav
(51) 3308 7049

ANEXO XXI

(Artigo: "**EFEITO DA INCORPORAÇÃO DE RAP NA RESISTÊNCIA À TRAÇÃO INDIRETA DE MISTURAS DO TIPO BSM ESTABILIZADAS COM EMULSÃO ASFÁLTICA"** 26º Encontro Nacional de Conservação Rodoviária (ENACOR) 49ª Reunião Anual de Pavimentação (RAPv) - Aracaju/SE)

26º Encontro Nacional de Conservação Rodoviária (ENACOR)
49ª Reunião Anual de Pavimentação (RAPv)

EFEITO DA INCORPORAÇÃO DE RAP NA RESISTÊNCIA À TRAÇÃO INDIRETA DE MISTURAS DO TIPO BSM ESTABILIZADAS COM EMULSÃO ASFÁLTICA

Daniel Wolter Martell[1]; Washington Peres Núñez [2]; Lélio Antônio Teixeira Brito[2]

RESUMO
Este estudo teve como objetivo avaliar o efeito da incorporação de RAP na resistência à tração indireta de misturas do tipo BSM estabilizadas com emulsão asfáltica. As misturas estudadas foram compostas por brita graduada simples (BGS), fresado (RAP), cimento e emulsão. Foram adicionados quatro teores de emulsão: 2,9%, 3,1%, 3,3% e 3,5%, definidos em função da granulometria dos materiais. Os percentuais de RAP incorporados foram de 20% e 40%, buscando simular, respectivamente, a técnica de reciclagem profunda (FDR) em uma estrutura de pavimento com revestimento asfáltico delgado e com espessura intermediária. O conteúdo de cimento foi fixado em 1%, para todas as amostras. Durante a moldagem dos corpos de prova, foi utilizada a compactação vibratória. O cimento empregado foi do tipo CP IV-32. Foi aplicada uma emulsão asfáltica catiônica modificada por polímeros elastoméricos de ruptura lenta, do tipo RL1C-E. Houve dificuldades para promover a densificação adequada dos corpos de prova, sendo que o martelo demolidor utilizado parece não ser indicado para compactação de materiais similares aos desse estudo. A incorporação de RAP promoveu um aumento nos valores do parâmetro ITS. Esse comportamento foi observado para todos os teores de emulsão asfáltica empregados e para ambas as condições de cura (seca e imersa). Os resultados obtidos indicam que o grau de compactação influencia de forma significativa o parâmetro ITS. O processo de quarteamento, realizado em laboratório para redução das amostras coletadas em campo, parece não ter sido eficaz para reduzir a variabilidade obtida nas densidades dos corpos de prova. Cabe destacar que dentre os 48 corpos de prova rompidos, o maior valor obtido para ITS foi de 312 kPa.

PALAVRAS-CHAVE: compactação vibratória; resistência à tração indireta; misturas tipo BSM, RAP, emulsão.

ABSTRACT
This study aimed to evaluate the effect of incorporating RAP on the indirect tensile strength of BSM mixtures stabilized with asphalt emulsion. The mixtures studied were composed of graded crushed stone, reclaimed asphalt Pavement (RAP), cement and emulsion. Four emulsion levels were added: 2.9%, 3.1%, 3.3% and 3.5%, defined depending on the particle size of the materials. The percentages of RAP incorporated were 20% and 40%, seeking to simulate, respectively, the full-depth reclamation (FDR) in a pavement structure with thin and intermediate thickness asphalt coating. The cement contente was set at 1% for all samples. During the molding of the specimens, vibratory compaction was used. The cement used was CP IV-32 type. A cationic asphalt emulsion modified by slow-breaking elastomeric polymers, type RL1C-E, was Applied. There were difficulties in promoting adequate densification of the specimens, and the demolition hammer used seems not to be suitable for compacting materials similar to those in this study. The incorporation of RAP promoted na increase in the values of the ITS parameter. This behavior was observed for all asphalt emulsion levels used and for both curing conditions (dry and soaked). The results obtained indicate that the degree of compaction significantly influences the ITS parameter. The quartering process, carried out in the laboratory to reduce samples collected in the field, appears not to have been effective in reducing the variability obtained in the densities of the specimens. It is worth noting that among the 48 specimens, the highest value obtained for ITS was 312 kPa.

KEY WORDS: vibratory compaction; indirect tensile strength; BSM mixtures, RAP, emulsion.

[1] Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Sul-rio-grandense, danielmartell@ifsul.edu.br.
[2] Universidade Federal do Rio Grande do Sul, washington.nunez@ufrgs.br; lelio.brito@ufrgs.br.

INTRODUÇÃO

A engenharia civil pode ser considerada um dos pilares da economia mundial. O porte atingido pela indústria da construção tem sido alcançado por meio da utilização de inúmeros recursos naturais gerando, historicamente, um grande ônus ambiental. Essa percepção histórica, aliada aos conceitos atuais de sustentabilidade e economia circular, vem provocando uma mudança de postura na sociedade em geral. Dessa forma, cada vez mais estudos e pesquisas vêm sendo desenvolvidos no intuito de reutilizar materiais já existentes os quais, ao terem suas propriedades recuperadas, passam a ser novamente utilizados, fazendo com que a exploração de jazidas e materiais virgens seja reduzida. A reciclagem profunda de pavimentos, também conhecida como FDR – da sigla em inglês *Full-Depth Reclamation* – área na qual se insere o presente trabalho, vem a contribuir com esse contexto.

Diversas metodologias de dosagem internacionais e grande parte das especificações técnicas brasileiras levam em consideração, para fins de definição dos teores de projeto a serem aplicados nas misturas tipo BSM – da sigla em inglês *Bitumen Stabilized Materials* – a resistência à tração indireta (ITS, da sigla em inglês *Indirect Tensile Strength*). Esse cenário destaca a importância dessa propriedade levando em consideração esse tipo de estabilização. A nível nacional, o "banco de dados" disponível para o dimensionamento de pavimentos considerando a aplicação de misturas do tipo BSM pode ser considerado insatisfatório. Sendo assim, parece oportuno que pesquisas envolvendo o parâmetro ITS para essa categoria de material sejam desenvolvidas.

Este estudo teve como objetivo avaliar a influência da incorporação de RAP – da sigla em inglês *Reclaimed Asphalt Pavement* – na resistência à tração indireta de misturas do tipo BSM estabilizadas com emulsão asfáltica. Para atingir tal objetivo, foram adicionados dois teores de RAP nas misturas, iguais a 20% e 40%. Também foram acrescentados quatro teores de emulsão, definidos em função da granulometria dos materiais, iguais a 2,9%, 3,1%, 3,3% e 3,5%. Dessa maneira, foi possível avaliar a influência da incorporação de RAP no parâmetro ITS para os diferentes teores de ligante incorporados.

CONCEITUAÇÃO E ASPECTOS GERAIS DAS MISTURAS TIPO BSM

De acordo com a *Southern African Bitumen Association* (SABITA, 2020), o comportamento das misturas tipo BSM é bastante semelhante ao de materiais granulares não cimentados, porém com níveis significativamente maiores de coesão e reduzida sensibilidade à umidade. Normalmente, pequenas quantidades de fíler ativo, como cimento ou cal hidratada, são adicionados à mistura em conjunto com a emulsão asfáltica ou espuma de asfalto. A presença do fíler ativo acaba por auxiliar o processo de dispersão do ligante. A hidratação do cimento ou da cal reduz o teor de umidade na mistura e ajuda a resistir à desagregação precoce causada pela ação do tráfego. Também pode ser observado um ganho de resistência gradual ocasionado pelas forças de ligação existentes entre o ligante e os agregados, efeito esse que é aprimorado pela presença do fíler ativo, proporcionando uma resistência de longo prazo aos danos provocados pela umidade (SABITA, 2020).

O documento da SABITA (2020) expõe ainda as principais características envolvidas no comportamento dos BSMs, as quais são destacadas a seguir:

> a) Os BSMs obtêm um aumento significativo na coesão quando comparados aos materiais não tratados. O ângulo de atrito interno dos BSMs é bastante semelhante ao do material não tratado;

b) Os BSMs adquirem resistência à flexão e uma certa rigidez como resultado das propriedades viscoelásticas do ligante disperso na mistura. Todavia, as partículas maiores não são revestidas pela película de ligante de forma contínua, não ficando totalmente "ligadas". Dessa forma, os BSMs retêm as características granulares do material original, sendo sua rigidez dependente do estado de tensões e não estando propensos ao trincamento por fadiga;
c) O ligante asfáltico fica disperso, principalmente, no entorno das partículas menores, o que acaba por encapsular e imobilizar as mesmas. Isso promove uma redução na susceptibilidade à umidade, melhorando a durabilidade dos BSMs. Uma vez que os finos estão "colados", a tendência dos BSMs de bombear finos ao ser solicitado pelas cargas do tráfego é significativamente reduzida;
d) De forma semelhante aos materiais granulares não tratados, a rigidez dos BSMs em uma camada de pavimento depende de alguns fatores como: a qualidade inerente do material não tratado; a densidade atingida pelo material; os teores de ligante e fíler ativo adicionados e sua dispersão na mistura; o clima local (principalmente a temperatura e a precipitação) e a rigidez da camada subjacente. Importante destacar que o elevado aumento na coesão bem como a pequena variação no ângulo de atrito interno do BSM são os fatores responsáveis por permitir que o mesmo seja capaz de sustentar um maior nível de rigidez quando uma carga é aplicada;
e) O principal mecanismo de falha dos BSMs é a deformação permanente;
f) O comportamento dos BSMs pode variar consideravelmente e depende da qualidade do material não tratado bem como das quantidades de ligante e fíler ativo aplicadas. Quando cimento em excesso é adicionado, a mistura pode acabar se comportando como um material tratado com cimento, sendo que o benefício da adição do ligante passe a ser discutível. Por esta razão, a adição de cimento deve ser limitada a 1% (em massa). Adicionalmente, existindo a presença de sílica no material não tratado, o potencial para reação pozolânica com o fíler ativo precisa ser examinado.

Feita a apresentação das principais características das misturas tipo BSM, cabe um esclarecimento. O fato de a adição de cimento ser limitada a 1% não indica que o acréscimo de teores mais elevados possa ser, obrigatoriamente, prejudicial para a mistura. Essa limitação busca apenas garantir que as misturas do tipo BSM se comportem, de fato, como materiais granulares. Resultados obtidos por Andrade (2017) e Kuchiishi (2019) no ensaio triaxial de módulo de resiliência (MR) indicam que misturas contendo teores de cimento a partir de 2% não apresentam relação entre o MR e as tensões confinantes (σ_3) aplicadas assemelhando-se, dessa maneira, aos materiais cimentados. Nesse caso, eles estariam sujeitos, por exemplo, ao trincamento por fadiga. Cabe destacar que, na estabilização com emulsão, uma das principais funções do fíler ativo consiste em auxiliar o processo de dispersão do ligante na mistura, diferentemente do que ocorre na estabilização com cimento, em que o ganho de rigidez é o principal benefício esperado.

PROGRAMA EXPERIMENTAL

Os experimentos foram programados com base na metodologia de dosagem da Sabita (2020). Quanto ao conteúdo de cimento, optou-se pelo teor de 1%, destacando-se que não foi incluída no programa experimental a etapa de dosagem que versa sobre a seleção do fíler ativo. Maiores

esclarecimentos sobre esse procedimento de dosagem podem ser obtidos nos estudos de Martell (2022), Martell e Núñez (2023).
Na presente pesquisa, foram utilizados dois conteúdos de RAP, iguais a 20% e 40%. O primeiro teor foi definido buscando simular a técnica da reciclagem tipo FDR em uma estrutura de pavimento com revestimento asfáltico delgado, enquanto o segundo, uma camada de CBUQ com espessura intermediária. Cabe destacar que de acordo com a *Portland Cement Association* (PCA, 2017), a reciclagem do tipo FDR é um método de reabilitação que envolve a reciclagem de um pavimento asfáltico existente (camada superficial) e sua camada inferior, transformando essa mistura reciclada em uma nova camada de base.
Além do RAP, foi incorporada às misturas brita graduada simples (BGS), simulando a camada subjacente de base. Dessa forma, as duas misturas estudadas possuem as seguintes composições: 80% BGS/20% RAP e 60% BGS/40% RAP, ambas com incorporação de 1% de cimento. Considerando uma profundidade de reciclagem de 25 cm, as misturas 80% BGS/20% RAP e 60% BGS/40% RAP equivalem, respectivamente, a uma estrutura de pavimento com 5 cm de CBUQ/20 cm de BGS e 10 cm de CBUQ/15 cm de BGS. A determinação exata dos percentuais de cada material e suas espessuras em campo deve ser feita mediante a consideração das densidades *in situ*, sendo que as estruturas aqui apresentadas podem ser consideradas aproximadas. Maiores esclarecimentos sobre esse aspecto podem ser obtidos no documento TG2 (SABITA, 2020).

MATERIAIS

Materiais Procedentes da Coleta de Campo (RAP e BGS)

A BGS, de origem granítica, foi coletada junto a um fornecedor localizado no município de Eldorado do Sul/RS. O RAP foi recolhido em um depósito localizado às margens da rodovia BR-290 (km 134), próximo ao município de Eldorado do Sul/RS. Cabe destacar que não foi possível obter informações acerca do tipo de CAP presente no RAP. Ambos os materiais foram armazenados em bombonas plásticas de 200 litros, as quais foram mantidas em um depósito fechado até que os agregados fossem ensaiados. A Tabela 1 apresenta os resultados dos ensaios de caracterização realizados na BGS, os quais foram executados pelo próprio fornecedor do agregado.

Tabela 1. Resultados dos ensaios realizados para caracterização da BGS.

Propriedade	Normativa do ensaio	Resultado	Especificação (DNIT 141/2010-ES)
ISC	NBR 9895/17	176%	≥ 80%
Expansão	NBR 9895/17	0%	≤ 0,5%
Limite de liquidez	DNER-ME 082/94	NP	≤ 25%
Índice de plasticidade	DNER-ME 082/94	NP	≤ 6%
Equivalente de areia	DNER-ME 054/97	63,3%	> 30%
Absorção	DNER-ME 195/97	0,6%	-
Abrasão "Los Angeles"	DNER-ME 035/98	21%	≤ 55%
Índice de forma	DNIT-ME 424/20	0,8%	-

Cimento

Foi utilizado um cimento do tipo CP IV-32. A escolha da classe intermediária de resistência (32 MPa) pode ser justificada, de acordo com Fedrigo (2015), pelo fato de haver diversas experiências com o uso desse tipo de cimento em serviços de reciclagem de pavimentos. Sabita (2020) relata que podem ser utilizados diferentes tipos de cimento na estabilização de misturas a frio com emulsão asfáltica, devendo ser evitados aqueles com endurecimento rápido.

Emulsão Asfáltica

Foi aplicada uma emulsão asfáltica catiônica modificada por polímeros elastoméricos de ruptura lenta, do tipo RL1C-E. Denominada Recycla RP, o ligante foi fornecido por uma empresa parceira da pesquisa. Greca Asfaltos (2021) destaca em seu portfólio de produtos que a Recycla RP está inserida na categoria das emulsões especiais, sendo seu uso recomendado para reciclagem do tipo FDR. O catálogo ainda cita que Recycla é a linha de emulsões indicada para produção de misturas a frio com utilização de até 100% de RAP, atuando diretamente na reativação das características aglutinantes do ligante. A Tabela 2 apresenta os resultados dos ensaios de caracterização realizados na emulsão, valendo destacar que eles foram executados pelo próprio fornecedor.

Tabela 2. Resultados dos ensaios realizados para caracterização da emulsão.

Propriedade	Normativa do ensaio	Resultado	Especificação (resolução ANP n°36)	
			Mínimo	Máximo
Saybolt Furol	NBR 14491/07	25 s	-	70 s
Sedimentação	NBR 6570/16	1,6%	-	5%
Peneiração	NBR 14393/12	0,01%	-	0,1%
Carga de partícula	NBR 6567/15	Positiva	Positiva	
Resíduo seco	NBR 14376/19	60,5%	60%	-
pH	NBR 6299/12	4	-	6,5

MÉTODOS

Caracterização das Misturas (RAP + BGS + cimento + emulsão)

As curvas granulométricas foram determinadas a partir das granulometrias individuais dos agregados RAP e BGS, sendo seguidas as diretrizes constantes no método de ensaio DNER-ME 083 (DNIT, 1998). Dessa maneira, foi possível verificar se elas se encontravam dentro do intervalo preconizado pelo método de dosagem Sabita (2020).

As curvas de compactação buscaram determinar os parâmetros de moldagem ($\gamma_{dmáx}$. e OFC, da sigla em inglês *Optimum Fluid Content*). Para isso, foram seguidas as orientações contidas no método de ensaio DNIT-ME 164 (DNIT, 2013), com algumas adaptações. Primeiramente, cabe destacar que foram eliminadas todas as partículas retidas na peneira de #19mm (3/4"), tanto no RAP quanto na BGS, não havendo a substituição dessa parcela de agregados graúdos pela fração compreendida entre as peneiras de #19mm e #4,8mm, aspecto recomendado pela normativa supracitada. De acordo com o TG2 (SABITA, 2020), quando houver material retido na peneira #20mm, o mesmo deverá ser levemente triturado até que sua totalidade passe por essa abertura, devendo essa parcela ficar retida na malha de #14mm. Na impossibilidade de reduzir o tamanho desses agregados, optou-se apenas pela eliminação da fração retida na peneira #19mm.

Os ensaios de compactação foram executados sem reuso de material, empregando-se o cilindro e o soquete grandes, sendo aplicada a energia modificada. As amostras foram secas ao ar, sendo o cimento adicionado, no teor de 1%, considerando as suas massas secas. As misturas foram produzidas de forma manual. Tradicionalmente, a obtenção das curvas de compactação é feita mediante a adição de água. Entretanto, de acordo com o TG2 (SABITA, 2020), no caso das misturas tipo BSM estabilizadas com emulsão, deve ser preparado um fluido composto por 50% de água e 50% de emulsão, devido ao fato do ligante residual também ser considerado um fluido que contribui para o processo de compactação. Para cada teor de fluido adicionado, foi determinado o peso do conjunto (molde + material compactado). Aplicando a equação (1), foi determinado o peso específico aparente seco (γ_{seco}) para cada ponto da curva de compactação.

$$\gamma_{seco} = \frac{\gamma_{úmido}}{1+FC} \quad (1)$$

Onde: γ_{seco} = peso específico aparente seco (g/cm³); $\gamma_{úmido}$ = peso específico aparente úmido (g/cm³); FC = teor de fluido (teor de água + emulsão).

Definição dos Teores de Emulsão Asfáltica Incorporados

O teor inicial de emulsão foi definido pela curva granulométrica das misturas. A metodologia Sabita (2020) preconiza o acréscimo de quatro teores distintos, sendo eles: teor inicial - 0,4%; teor inicial - 0,2%; teor inicial; teor inicial + 0,2%. De acordo com a metodologia de dosagem, essa etapa busca otimizar e definir o conteúdo a ser empregado no projeto final das misturas BSM.

Preparação e Compactação das Amostras

As misturas foram produzidas de forma manual, buscando-se adotar o mesmo tempo de homogeneização quando cada um dos materiais era adicionado (2 a 3 minutos). As amostras foram secas ao ar e, após a determinação das suas umidades, foi calculada a massa seca da mistura, parâmetro utilizado para determinar as quantidades de cimento e emulsão a serem adicionadas.

Importante salientar que nessa etapa não foi feita a diluição da emulsão, sendo esse processo realizado apenas na obtenção das curvas de compactação. Ainda, o primeiro insumo a ser adicionado às misturas foi a água, seguido pelo cimento e, por fim, foi feito o acréscimo da emulsão. A definição da quantidade de água a ser incorporada foi feita respeitando-se o OFC obtido através das curvas de compactação. A equação (2) apresenta essa relação, que leva em conta os teores de fluido, água, emulsão e umidade higroscópica dos agregados.

$$OFC = WC + EC + HM \quad (2)$$

Onde: OFC = teor de fluido ideal determinado na curva de compactação (%); WC = teor de água a ser adicionado (%); EC = teor de emulsão (%); HM = umidade higroscópica dos agregados (%).

Os corpos de prova foram moldados nas dimensões 150x95mm (diâmetro x altura), com auxílio de um molde tripartido, empregando-se a compactação vibratória. Foi utilizado um martelo demolidor da marca Bosch, modelo GSH 500, com uma potência nominal de 1100 W e uma energia de impacto de 7,5 J por golpe, sendo acoplada na sua extremidade uma ponteira adaptada. Inicialmente, os corpos de prova foram confeccionados em duas camadas. Todavia, foi observado que o $\gamma_{dmáx.}$ não estava sendo alcançado, mesmo com o incremento no tempo de compactação aplicado. Dessa forma, os corpos de prova passaram a ser moldados em três camadas. Vale destacar que essas recomendações constam no TG2 (SABITA, 2020). Durante as moldagens, o controle do tempo de compactação, o qual variou entre 30 e 120 segundos, foi feito mediante a aferição das alturas, sendo realizado o processo de escarificação entre as camadas.

Cura Controlada das Amostras

Após a compactação, os corpos de prova foram submetidos a um processo de cura controlada conforme a descrição apresentada a seguir:

a) Finalizada a remoção dos corpos de prova dos moldes, eles foram identificados e colocados em estufa a uma temperatura de 40°C por um período mínimo de 72 horas;

b) Depois das 72 horas, os corpos de prova foram retirados da estufa e pesados, sendo suas massas individuais registradas;
c) Todos os corpos de prova foram recolocados na estufa a 40°C por mais quatro horas e, passado esse período, o exercício de pesagem foi repetido. Como a massa de todos os corpos de prova apresentou uma diferença inferior a dez gramas (critério de aceitação), ou seja, praticamente foi atingida a constância de massa, eles foram removidos da estufa;
d) Os corpos de prova foram então colocados sobre uma bancada até que fosse alcançada a temperatura de 25°C. Após o resfriamento ser realizado por um período mínimo de 20 horas, foram determinadas as densidades aparentes secas de cada corpo de prova;
e) Foram excluídos das análises todos os corpos de prova que apresentaram uma densidade aparente individual superior a +/- 2,5% da média obtida para o conjunto, sendo considerado como conjunto os seis corpos de prova moldados para cada teor de emulsão incorporado;
f) Feita a análise estatística, os corpos de prova não submetidos a imersão foram rompidos. Já a outra metade dos corpos de prova (três para cada teor de emulsão) foram colocados em um banho de imersão com água a 25°C, por um período de 24 horas. Após serem removidos da água, suas superfícies foram secas e o ensaio ITS foi realizado imediatamente.

Determinação da Resistência à Tração Indireta (ITS)
Para determinação da ITS foram moldados corpos de prova em triplicata, levando-se em consideração o teor de emulsão e o tipo de cura realizada. Dessa maneira, foram confeccionados 24 corpos de prova para cada mistura, totalizando 48 moldagens.
O ensaio para determinação da ITS foi executado de acordo com a normativa DNIT-ME 136 (DNIT, 2018), desenvolvido originalmente para misturas asfálticas. Considerando a carga de ruptura aplicada, o parâmetro ITS foi calculado mediante a aplicação da equação (3).

$$ITS = \frac{2F}{100\pi DH} \quad (3)$$

Onde: ITS = resistência à tração indireta (MPa); F = carga de ruptura (N); D = diâmetro do corpo de prova (cm); H = altura do corpo de prova (cm).

APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Caracterização das Misturas
As curvas granulométricas das misturas são apresentadas na Figura 1. Nela, também é possível observar a faixa granulométrica recomendada para reciclagem de materiais com incorporação de emulsão asfáltica de acordo com o TG2 (SABITA, 2020). Considerando que as granulometrias se encontram dentro dos limites propostos, não foi necessária a adição de nenhum outro tipo de agregado, sendo dispensável o processo de estabilização granulométrica. Devido ao fato de ambas as misturas apresentarem uma fração passante na peneira #4,75mm inferior a 50% e, ainda, considerando que o teor de finos (passante #0,075mm) obtido para ambas as misturas foi menor do que 4%, o teor inicial de emulsão a ser adicionado foi definido como sendo **3,3%**. Maiores detalhes sobre a definição do conteúdo inicial de emulsão podem ser obtidos nos documentos TG2 (SABITA, 2020), Martell (2022), Martell e Núñez (2023).

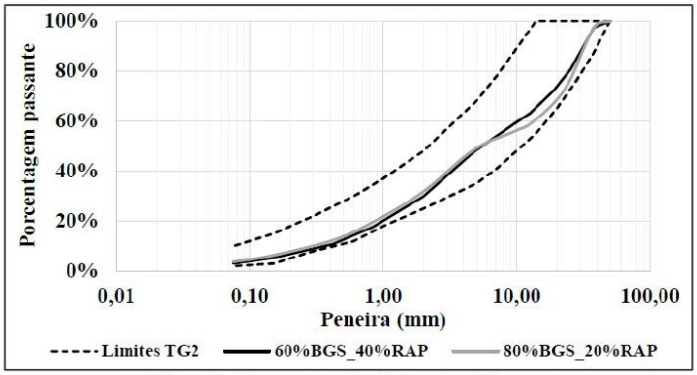


Figura 1. Curvas granulométricas das misturas.

As curvas de compactação das misturas são exibidas na Figura 2. Para fins de comparação, também foi inserida a curva do agregado tipo BGS. Destaca-se que a incorporação de RAP promoveu uma redução no $\gamma_{dmáx.}$ e na $w_{ót.}$ (umidade ótima) dos materiais. É possível verificar que quanto maior o teor de RAP incorporado, maior a redução observada no $\gamma_{dmáx.}$. Esse comportamento já foi relatado por outros autores como Specht *et al.* (2013) e Fedrigo (2015), dentre outros. Com relação ao parâmetro OFC, a variação nos teores de RAP não promoveu uma influência significativa. Isso talvez possa ser explicado pelo fato de as curvas granulométricas de ambas as misturas exibirem considerável similaridade, com um conteúdo de finos praticamente idêntico (3%), fazendo com que a adição de um mesmo teor de fluido promova a máxima densificação dos materiais.

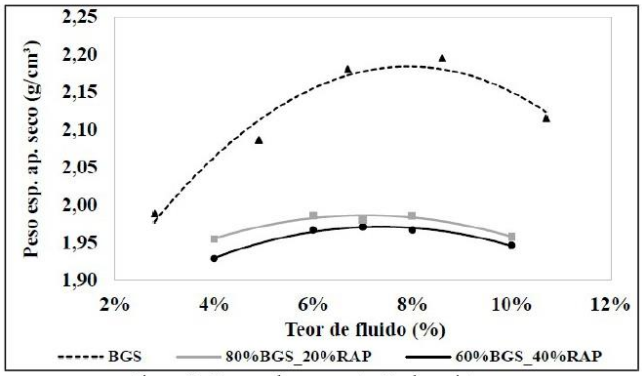


Figura 2. Curvas de compactação das misturas.

Baseado nos resultados dos ensaios de granulometria e compactação, foi possível definir os teores de emulsão e água a serem acrescentados às misturas bem como os seus parâmetros de moldagem. A Tabela 3 apresenta uma síntese dessas definições, incluindo o número de corpos de prova confeccionados e os parâmetros de moldagem do agregado tipo BGS.

Tabela 3. Parâmetros obtidos na etapa de caracterização das misturas.

Mistura	Tipo de cura	N° de corpos de prova	Parâmetros de moldagem		Teores adicionados	
			OFC	$\gamma_{dmáx.}$	Emulsão	Água
80%BGS_20%RAP (1% cimento)	Seca	3	7%	1,985 g/cm³	2,9%	4,1%
		3			3,1%	3,9%
		3			**3,3%**	3,7%
	Seca + imersão	3			3,5%	3,5%
		3			2,9%	4,1%
		3			3,1%	3,9%
		3			**3,3%**	3,7%
		3			3,5%	3,5%
60%BGS_40%RAP (1% cimento)	Seca	3	7,4%	1,970 g/cm³	2,9%	4,5%
		3			3,1%	4,3%
		3			**3,3%**	4,1%
	Seca + imersão	3			3,5%	3,9%
		3			2,9%	4,5%
		3			3,1%	4,3%
		3			**3,3%**	4,1%
		3			3,5%	3,9%
Agregado tipo BGS			8% ($w_{ót}$)	2,180 g/cm³	-	-
Total	-	48	-	-	-	-

Efeito da Incorporação de RAP na Resistência à Tração Indireta (ITS)

A figura 3 exibe os resultados da ITS em função do teor de RAP incorporado às misturas. Os dados representam a média dos corpos de prova moldados em triplicata, levando em consideração os teores de emulsão acrescentados e o tipo de cura realizado.

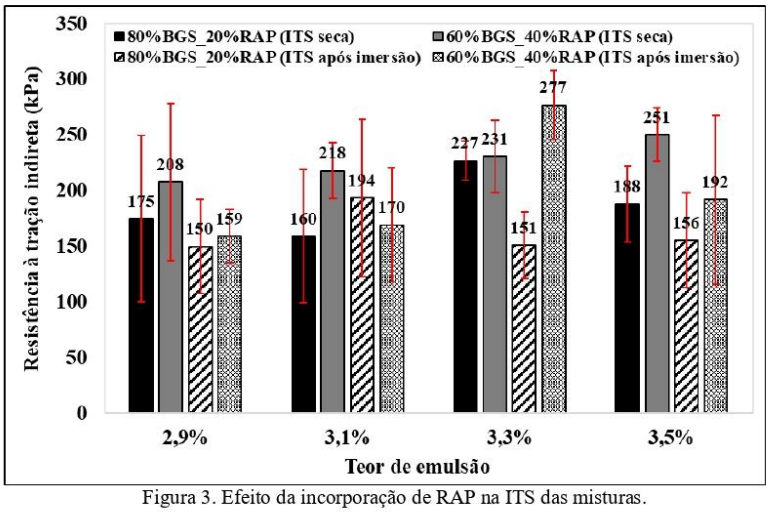


Figura 3. Efeito da incorporação de RAP na ITS das misturas.

Um primeiro aspecto a ser observado é que, no caso dos corpos de prova não submetidos à imersão, a mistura 60%BGS_40%RAP alcançou os melhores resultados, independentemente do teor de emulsão acrescentado. Isso vem ao encontro de alguns resultados observados na literatura, pois a

mistura com maior percentual de RAP, por possuir uma quantidade superior de ligante oxidado e, considerando que a emulsão utilizada nesse estudo rejuvenesce as propriedades desse insumo, é totalmente compreensível que a mistura 60%BGS_40%RAP obtenha um desempenho superior.

Considerando a cura controlada sem imersão, o maior acréscimo de ITS, de aproximadamente 36%, foi observado para o conjunto de corpos de prova moldados com 3,1% de emulsão. Os corpos de prova com 3,5% de emulsão obtiveram um ganho de 33,5%, enquanto os com 2,9% de emulsão alcançaram um aumento de 19%. Nessas três situações, os graus de compactação alcançados pelos conjuntos de corpos de prova, considerando cada condição de cura, foram relativamente próximos, com uma variação máxima de 1,7%. Para os corpos de prova moldados com 3,3% de emulsão, o acréscimo na ITS foi praticamente nulo, com um ganho de 1,8%. Tal comportamento pode ser explicado pelo fato de os corpos de prova da mistura 80%BGS_20%RAP com 3,3% de emulsão terem alcançado um grau de compactação médio de 94,6%, enquanto os corpos de prova da mistura 60%BGS_40%RAP atingiram uma média de 91,4%, ou seja, uma variação de 3,2%. Isso fez com que o desempenho da mistura com menor percentual de RAP fosse alavancado, inibindo o efeito da incorporação de tal agregado frente ao parâmetro ITS. Tal situação indica que um aumento na densidade influencia de forma positiva a ITS. Aqui, cabe citar o trabalho de Jenkins; Greyling e Collings (2021), estudo o qual afirma que o aumento do conteúdo de RAP promove uma queda nos teores de projeto, devido ao melhor comportamento das misturas BSM frente ao parâmetro ITS.

No caso dos corpos de prova submetidos à imersão, a situação se manteve idêntica, com exceção do conteúdo de emulsão de 3,1%. Nesse teor específico, a mistura com menor percentual de RAP obteve um melhor desempenho. Analisando as informações de maneira mais detalhada, percebe-se que o conjunto de corpos de prova da mistura 80%BGS_20%RAP obteve um grau de compactação médio de 93,6%, enquanto o conjunto da mistura 60%BGS_40%RAP atingiu 91,2%. Sendo assim, sabendo-se que maiores graus de compactação afetam de forma positiva a ITS, explica-se parcialmente os resultados obtidos. Ainda, considerando que os corpos de prova com menor grau de compactação possuem um maior índice de vazios (e%) e, consequentemente, uma menor resistência aos efeitos deletérios da umidade, os mesmos tendem a sofrer uma maior influência dos danos causados pela imersão, devido ao preenchimento dos vazios pela água, aspecto que também ajuda a explicar tal situação. As conclusões obtidas no estudo de Yang *et al*. (2021) destacam que a redução do índice de vazios, ou seja, a promoção de maiores graus de compactação é uma maneira eficiente de aumentar a ITS dos materiais. Os resultados aqui obtidos corroboram essa tendência.

Também vale citar que o conjunto de corpos de prova da mistura 60%BGS_40%RAP submetidos à imersão com 3,3% de emulsão incorporada apresentou os melhores resultados de ITS. Para essa situação, foi observado um aumento de aproximadamente 83% em tal parâmetro. Avaliando o grau de compactação médio obtido para esse grupo, percebe-se que as densidades ficaram em patamares muito próximos aos demais conjuntos, não podendo ser indicada como uma razão para o melhor desempenho. Sendo assim, aparentemente, esses resultados indicam uma possível variabilidade existente no próprio processo de confecção dos corpos de prova, não sendo identificado nenhum aspecto notável que possa explicar tal comportamento. Cabe destacar que dentre os 48 corpos de prova rompidos, o maior valor obtido para ITS foi de 312 kPa.

Por fim, é importante mencionar que as barras de erro presentes na figura 3 indicam que houve uma elevada variabilidade nos resultados obtidos. Tal ocorrência sugere que, devido ao fato de os materiais aqui estudados terem sido coletados em campo, o processo de quarteamento realizado em laboratório para redução das amostras parece não ter sido eficaz para reduzir a variabilidade e,

ainda, por se tratar de misturas recicladas, a variabilidade existente pode ser uma condição inerente ao próprio tipo de material utilizado.

CONCLUSÕES

Abaixo são destacadas as principais conclusões desse trabalho:

a) Houve dificuldades para promover a densificação adequada das misturas. Dessa forma, o martelo demolidor aqui empregado parece não ser indicado para compactação de materiais similares aos desse estudo;
b) A incorporação de RAP promoveu um aumento nos valores do parâmetro ITS. Esse comportamento foi observado para todos os teores de emulsão e para ambas as condições de cura. Considerando que a emulsão incorporada promove a reativação parcial do ligante oxidado no RAP, fazendo com que suas propriedades viscoelásticas sejam restauradas, justifica-se tal comportamento. Dessa forma, o RAP pode ser considerado um agregado nobre, devendo a sua reutilização ser cada vez mais estimulada.
c) Os resultados obtidos indicam que o grau de compactação influencia de forma significativa o parâmetro ITS. Sendo assim, é imprescindível que uma densificação adequada das misturas tipo BSM seja alcançada para o seu adequado comportamento. Nesse contexto, cabe destacar que existe uma variabilidade inerente no processo de compactação vibratória, sendo observadas dispersões nas densidades. Sendo assim, embora o método de compactação do tipo vibratório seja aquele aplicado em campo, o autor gostaria de destacar que, do ponto de vista exclusivamente laboratorial, a compactação giratória tende a resultar em uma menor variabilidade na etapa de moldagem, haja vista o monitoramento contínuo da altura e densidade dos corpos de prova realizado pelo equipamento giratório;
d) Devido ao fato de os materiais aqui estudados terem sido coletados em campo, o processo de quarteamento realizado em laboratório para redução das amostras parece não ter sido eficaz para reduzir a variabilidade. Tal fato fez com que as densidades obtidas pelos corpos de prova fossem relativamente distintas, situação que afetou de forma negativa as análises aqui realizadas, que buscaram considerar exclusivamente o efeito da incorporação de RAP no parâmetro ITS. Para pesquisas futuras, a fim de mitigar a influência da variabilidade e as consequentes diferenças nas densidades, o autor sugere que as amostras sejam preparadas dentro do laboratório, com a pesagem específica dos materiais em cada uma das peneiras.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDRADE, L.R. **Comparação do comportamento de pavimentos asfálticos com camadas de base granular, tratada com cimento e com estabilizantes asfálticos para tráfego muito pesado**. 2017. 179 p. Thesis (Master in Transportations Engineering), Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14491:2007:** Emulsões asfálticas – Determinação da viscosidade Saybolt Furol. Rio de Janeiro, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6299:2012:** Emulsões asfálticas – Determinação do pH. Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14393:2012:** Emulsões asfálticas – Determinação da peneiração. Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6567:2015:** Ligantes asfálticos – Emulsões asfálticas – Determinação da carga de partícula. Rio de Janeiro, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6570:2016:** Ligantes asfálticos – Determinação da sedimentação e estabilidade à estocagem de emulsões asfálticas. Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9895:2017:** Solo – Índice de suporte Califórnia (ISC) – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2017.
ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14376:2019:** ligantes asfálticos – Determinação do teor do resíduo seco de emulsões asfálticas convencionais ou modificadas – Métodos expeditos. Rio de Janeiro, 2019.
DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **Agregados – análise granulométrica**. DNER-ME 083/98. Rio de Janeiro, 5 p. 1998.
DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **Agregados – determinação da abrasão "Los Angeles"**. DNER-ME 035/98. Rio de Janeiro, 6 p. 1998.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **Agregados – determinação da absorção e da massa específica de agregado graúdo**. DNER-ME 195/97. Rio de Janeiro, 6 p. 1997.
DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **Equivalente de areia**. DNER-ME 054/97. Rio de Janeiro, 10 p. 1997.
DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **Solos – determinação do limite de plasticidade**. DNER-ME 082/94. Rio de Janeiro, 3 p. 1994.
DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Pavimentação – Agregado – Determinação do índice de forma com crivos – Método de ensaio**. DNIT 424/2020-ME. Rio de Janeiro, 9 p. 2010.
DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Pavimentação asfáltica – Misturas asfálticas – Determinação da resistência à tração por compressão diametral – Método de ensaio**. DNIT 136/2018-ME. Rio de Janeiro, 9 p. 2018.
DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Solos – Compactação utilizando amostras não trabalhadas – Método de ensaio**. DNIT 164/2013-ME. Rio de Janeiro, 7 p. 2013.
FEDRIGO, W. **Reciclagem de pavimentos com adição de cimento Portland: definição das bases para um método de dosagem**. 2015. 162 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escola de Engenharia. Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil. Porto Alegre, 2015.
GRECA ASFALTOS. **Portfólio de produtos**. (2021). 36 p. Disponível em: https://www.grecaasfaltos.com.br/wp-content/conteudos/catalogo-produtos-greca-asfaltosweb. pdf. Acesso em: 30 set. 2022.
JENKINS, K. J.; GREYLING, A. H.; COLLINGS, D. C. **Bitumen Stabilization of Base Layers for Pavement Rehabilitation Reaches Greater Heights**. 2021. International Airfield and Highway Pavements Conference 2021. Disponível em: https://ascelibrary.org/doi/10.1061/9780784483510.024. Acesso em: 29 jul. 2021.
KUCHIISHI, A. K. **Mechanical Behavior of Cold Recycled Asphalt Mixtures**. 2019. 191 p. Master Thesis (Engineering), Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2019.
MARTELL, D. W. **Reciclagem Profunda de Pavimentos Asfálticos com Emulsão: Aplicação da Metodologia de Dosagem Sul-Africana a Nível Nacional.** 156 p. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Construção e Infraestrutura. Porto Alegre, BR-RS, 2022.
MARTELL, D. W.; NÚÑEZ, W. P. **Dosagem de Misturas a Frio Recicladas com Emulsão: Aplicação da Metodologia Sul-Africana a Nível Nacional.** Anais do 25° Encontro Nacional de Conservação Rodoviária (ENACOR). Anais da 48ª Reunião Anual de Pavimentação (RAPv). 2023. Foz do Iguaçu/PR. Disponível em: https://rapvenacor.com.br/anais/2023/TT048.pdf. DOI: 10.29327/1304307.48-50.
PORTLAND CEMENT ASSOCIATION. **Guide to full-depth reclamation (FDR) with cement**. Report Nº SR1006P, 2017.
SOUTHERN AFRICAN BITUMEN ASSOCIATION. **Technical Guideline: Bitumen Stabilised Materials. A Guideline for the Design and Construction of Bitumen Emulsion and Foamed Bitumen Stabilised Materials.** Third Edition. July, 2020.
SPECHT, L. P.; PIRES, G. M.; VITORELO, T.; HIRSH, F.; CRONST, F.; BERGMANN, E. C.; TIEFENSEE, M. D. **Utilização de material fresado como camada de pavimento: estudo laboratorial e aplicação em campo**. Anais da 42ª Reunião Anual de Pavimentação. 2013. Gramado/RS, 2013. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/273980399. Acesso em: 8 ago. 2022.
YANG, W.; OUYANG, J.; MENG, Y.; HAN, B.; SHA, Y. **Effect of curing and compaction on volumetric and mechanical Properties of cold-recycled mixture with asphalt emulsion under diferente cement contents.** Construction and Building Materials 297, 123699. 2021. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123699. Acesso em: 23 jun. 2021.

ANEXO XXII

(Artigo: “**Impactos ambientais da produção de materiais estabilizados com emulsão de asfalto”** Revista Estradas ISSN 1807-426X Ano 23 - N° 29 - outubro 2024)


revista
Estradas
29
Sociedade dos Técnicos Universitários do DAER
ISSN 1807-426X
ANO 23
OUTUBRO 2024
Cobertura do
26º Enacor
49º RAPv
Encontro Nacional de Conservação Rodoviária
e Reunião Anual de Pavimentação
MUDANÇAS CLIMÁTICAS:
IMPACTOS NA INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES

REVISTA ESTRADAS
ISSN 1807-426X
Ano 23 - N° 29 - Outubro 2024-
Publicação da Sociedade dos Técnicos Universitários
do DAER/ Sociedade dos Engenheiros Civis do DAER
Av. Borges de Medeiros, 1555 - Prédio Anexo
CEP 90110-150 - Porto Alegre - RS
(51) 3210.5076

SUDAER
PRESIDENTE
Eng. Paulo Ricardo Aquino de Campos Velho
VICE-PRESIDENTE
RP Susana Goerck
SECRETÁRIA
Enga. Daniele Mello da Cunha
TESOUREIRA
Enga. Josani Carbonera Pereira

IDEALIZADORA
Enga. Sayene Paranhos Dias

COMISSÃO EDITORIAL
Enga. Bibiana Cardoso Fogaça
Eng. Carlos Alexandre Pinto Toniolo
Eng. Fabiano Fabrin Secchi
Enga. Daiani Trisch
Enga. Luana Rossini
Eng. Márcio Tassinari Stumpf
Enga. Marlova Grazziotin Johnston
Eng. Rodrigo Malysz
Enga. Sônia Maria Bortoluzzi
COMITÊ CIENTÍFICO
Prof. André Bock - UNIJUI
Prof. Daniel Garcia - UFRGS
Profa. Gracieli Bordin Colpo - PUCRS
Prof. Lélio Brito – UFRGS
Prof. Luciano Pivoto Specht - UFSM
Prof. Matheus Lemos Nogueira - UCS

JORNALISTA RESPONSÁVEL
Francisco Canabarro
Mtb 8569

DIAGRAMAÇÃO E FINALIZAÇÃO
Padda Comunicação



Capa

ERS 348
Maio/2024
Divulgação DAER

sumário

Reportagem
26º ENACOR e 49ª RAPv: Inovação e Sustentabilidade em Foco em Aracaju **05**

Ponto de Vista
Perspectivas para utilização de material reciclável (RAP) – Uma opinião **11**

Artigos
Análise da resiliência de pavimentos asfálticos frente ao incremento de temperatura resultante das mudanças climáticas **12**

Resiliência Climática Sob Ponto de Vista da Geotecnia de Infraestrutura Rodoviária **18**

Adaptação e resiliência frente aos impactos das mudanças climáticas na infraestrutura rodoviária **24**

Considerações acerca do impacto de alagamentos na infraestrutura e mobilidade urbana **33**

Estudo Paramétrico para Utilização dos Resultados do iPAVe no Âmbito do Programa CREMA **38**

Prata da Casa

Mobilidade e Justiça: A Importância das Estradas em Comunidades Quilombolas para a Equidade Racial do Rio Grande do Sul **44**

Adequações à prática local do DAER/RS nas composições de concreto asfáltico da metodologia SICRO. **54**

Análise econômica dos cenários de manutenção da malha rodoviária pavimentada do DAER/RS **59**

Enacor

Impactos ambientais da produção de materiais estabilizados com emulsão de asfalto **68**

Resiliência da infraestrutura rodoviária: estudo de caso da priorização de riscos em taludes com as metodologias GUT e AHP frente às mudanças climáticas 76

Análise de acidentalidade nas rodovias sob administração do DER/SP utilizando mapas de calor **82**

Declarações ambientais de produto como estratégia de governança de dados no setor de pavimentação rodoviária no brasil **88**

Monitoramento da mastofauna: uma ferramenta auxiliar para tomada de decisões visando a implantação de medidas de conservação da fauna em rodovias **96**

Considerações sobre os possíveis impactos de eventos climáticos extremos em pavimentos rodoviários: estudo de caso da malha da CCR VIASUL **102**

Particularização do Fator de Ajustamento das Deflexões em Função da Temperatura para Projetos de Restauração de Pavimentos **108**

Ferramenta de infraestruturas resilientes: planejamento e monitoramento frente às mudanças climáticas **115**

Agenda 123

As informações, os conceitos e as opiniões emitidos nos textos assinados são de inteira responsabilidade de seus autores.

Enacor

Impactos ambientais da produção de materiais estabilizados com emulsão de asfalto

Visando o uso de práticas sustentáveis, o material fresado de pavimento, ou RAP (Reclaimed Asphalt Pavement), pode ser reutilizado na produção de materiais estabilizados com emulsão de asfalto (Bitumen Stabilized Materials – BSM), possibilitando seu retorno à rodovia. A BSM vem ganhando espaço no Brasil e auxilia na redução da pegada ambiental por ser um material de aplicação a frio e com possibilidade de incorporação de elevados valores de RAP. Este trabalho objetiva quantificar os impactos ambientais oriundos da produção de BSM, a partir de uma análise de ciclo de vida, visando identificar oportunidades de melhoria do desempenho ambiental de seu processo produtivo. Para tanto, utilizou-se o software OpenLCA e a base de dados Ecoinvent 3.7.1, estando o escopo restrito aos módulos A1, A2 e A3, correspondente à fase de produção dos materiais, conforme proposto pela norma ISO 21930 (2017). O método utilizado foi o ReCiPe endpoint (H, A), cujos indicadores apresentam os impactos ambientais agregados nas categorias de saúde humana, biodiversidade e escassez de recursos. Os resultados demonstraram que o esgotamento de combustíveis fósseis, devido majoritariamente ao transporte de materiais, é o principal impacto ambiental da BSM analisada. Assim, verifica-se também que os impactos estão diretamente relacionados à emissão de CO2. Portanto, uma oportunidade de melhorar o desempenho ambiental da produção de BSM é a alternância para combustíveis oriundos de fontes renováveis, utilização de bioligantes ou a substituição da frota de veículos antigos por novos menos poluentes.

INTRODUÇÃO

Uma das principais técnicas de recuperação de pavimentos envolve a fresagem do revestimento asfáltico em conjunto com parte da base, também conhecido como Full Depth Reclamation (FDR). O material fresado é denominado no inglês de Reclaimed Asphalt Pavement (RAP), e consiste no resíduo da camada superficial de concreto asfáltico (CA). Frequentemente o RAP é descartado em local de aterro temporário, não sendo ideal do ponto de vista ambiental por diversas questões, inclusive pelo aumento de transporte necessário para seu posterior processamento.

No Brasil, o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT), por meio da resolução nº14/2021 (DNIT, 2021), dispõe que todos os projetos de engenharia de restauração, adequação de capacidade e ampliação de obras viárias deverão incluir o reaproveitamento do RAP eventualmente produzido no empreendimento, podendo este ser aplicado nas camadas do pavimento a serem construídas ou na execução de novos concretos asfálticos.

Segundo Dias et al. (2023), a pesquisa e aplicação de camadas de base compostas por materiais asfálticos reciclados, estabilizados com emulsão asfáltica, tem sido explorada em diversas configurações no Rio Grande do Sul. Tais misturas são internacionalmente conhecidas como Bitumen Stabilized Materials (BSM).

Moreira, Correia e Pereira (2006) afirmam a existência de estudos recentes demostrando que técnicas de reciclagem a frio, como a BSM, se mostram vantajosas no ponto de vista de economia de energia e proteção ambiental. Porém, a técnica de

Igor Sieczkowski Moreira
Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Leonardo Lunkes Wagner
Universidade Federal do Rio Grande do Sul - PPGCI - LAPAV
Mônica Regina Garcez
Universidade Federal do Rio Grande do Sul - PPGCI - LAPAV
Gracieli Bordin Colpo
Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul - Escola Politécnica
Lélio Antônio Teixeira Brito
Universidade Federal do Rio Grande do Sul - PPGCI - LAPAV

materiais estabilizados por asfalto, como o próprio nome já diz, é composta por materiais derivados do petróleo, além da possível adição, por exemplo, de cimento Portland. Sendo assim, mesmo que este material seja frequentemente relacionado à redução de impactos ambientais, o seu processo produtivo não é isento de danos ambientais, havendo necessidade de sua avaliação.

Neste contexto, este trabalho possui o objetivo de quantificar os impactos ambientais associados à produção de uma BSM composta por RAP, emulsão asfáltica e adição de agregados virgens e cimento Portland, a partir de uma análise de ciclo de vida (ACV), bem como identificar oportunidades para a melhoria do desempenho ambiental da produção de BSM com agregados provenientes das obras de restauração de rodovias.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O processo de estabilização de uma BSM ocorre quando a espuma de asfalto, ou emulsão asfáltica, é misturada com agregados virgens e/ou RAP (SABITA, 2020). Além do agente estabilizador, pode-se adicionar um filler ativo, como cal ou cimento. Materiais estabilizados por asfalto podem ser utilizados para a execução de pavimentos novos ou reabilitação de pavimentos antigos, e a estabilização pode ser realizada in situ ou em usina. No processo de reabilitação, comumente são utilizadas as técnicas de reciclagem profunda ou overlay.

Durante o processo executivo, a eficiência da compactação da BSM é dependente de seu teor de umidade. Grilli et al. (2014) demonstram que, em uma BSM composta por altos teores de umidade, inicialmente a água funciona como um lubrificante e permite a compactação efetiva. Porém, quando a energia absorvida pela pressão d'água torna-se dominante, há a diminuição da trabalhabilidade da mistura, fazendo com que a compactação perca seu efeito no intertravamento do esqueleto sólido. Por outro lado, o teor ótimo de umidade permite a obtenção do valor mínimo de volume de agregados, atingindo a saturação somente ao final do processo de compactação.

Um dos principais guias sobre BSM é o TG2 - Technical Guideline: Bitumen Stabilised Materials, da República da África do Sul (SABITA, 2020). O guia indica que a BSM apresenta características como significativa coesão, resistência à flexão pelo ligante disperso na mistura, baixa propensão ao trincamento quando submetido à tração, boa sensibilidade à umidade e durabilidade.

A busca por materiais inovadores, ambientalmente amigáveis e capazes de atender às demandas impostas, é essencial para garantir a qualidade dos pavimentos e o desenvolvimento sustentável. A reutilização de materiais de pavimentação, que seriam descartados ou subutilizados, está ganhando destaque nas pesquisas e nas demandas das construtoras de pavimentos rodoviários por meio de técnicas de reciclagem.

O RAP, conhecido no Brasil como fresado, é um material obtido na remoção de uma ou mais camadas do pavimento, por meio de um processo denominado de fresagem. Este material vem ganhando espaço nos processos de recuperação de pavimentos, pois apresenta uma boa granulometria e um percentual de ligante já incorporado. Em um passado recente, o fresado era descartado ou doado para prefeituras ou vizinhos de obras, pois não havia demanda para seu reaproveitamento.

A reciclagem consiste em uma técnica de reabilitação de rodovias que busca a reutilização de materiais já envelhecidos, incorporando-os em misturas com novos agregados, cimento, cal ou outros aditivos químicos (FEDRIGO, 2015; BERNUCCI et al.,

2022). Além disso, a execução da reciclagem pode ocorrer em campo ou em usinas, onde há um maior controle dos materiais e maior qualidade de mistura, embora exija o transporte do material até a usina (SABITA, 2020). A incorporação do fresado pode ser feita a quente ou a frio.

A utilização de agregados deve respeitar as propriedades necessárias para o tratamento bem- sucedido com o material asfáltico, incluindo características de durabilidade do agregado natural (não tratado), resistência (dureza), plasticidade, classificação, composição e características de intemperismo (SABITA, 2020).

Assim como os agregados virgens, o RAP deve ser classificado e estudado para compor a mistura de BSM. Preti et al. (2019) destacam que o RILEM TC237-SIB é o único protocolo de caracterização de RAP existente. O teste de coesão, desenvolvido no documento, funciona adequadamente como uma ferramenta para classificar e distinguir os diferentes tipos de RAP (PERRATON et al., 2016; PRETI et al., 2019). Referente especialmente à granulometria, encontra- se o dilema de se o RAP deve ser considerado como "black rock" (agregado negro) ou como sua granulometria original, após a extração do ligante asfáltico.

O método sul-africano de projeto de mistura trata o RAP como um agregado negro e não considera a contribuição do ligante asfáltico envelhecido na composição. Por outro lado, o procedimento de projeto de mistura, desenvolvido nos Estados Unidos, apresenta o RAP com maior porcentagem de agregados revestidos com ligante, pois seus pavimentos possuem maiores espessuras de camada betuminosa (CHANDRA, VEERARAGAVAN e KRISHNAN, 2013). Os manuais da ARRA (ARRA, 2016, 2017, 2018), bem como o Manual da Wirtgen (WIRTGEN GROUP, 2012) e o livro Pavimento Sustentável (BONFIM, 2021), consideram o RAP com sua granulometria não extraída, ou seja, como black rock.

Algumas agências consideram a contribuição do ligante envelhecido presente no RAP, mas a maioria trata o RAP da mesma forma que um agregado natural ou rocha negra, ou seja, o ligante é considerado inerte devido às baixas temperaturas de produção (MONDAL e KUNA, 2022). Contudo, a reativação das características aglutinantes do ligante presente no RAP pode ser obtida a

partir do aumento de temperatura, tanto dos agregados virgens, quanto do próprio RAP, e do aumento do tempo de mistura (MADRIGAL et al., 2017).

Com relação ao aditivo de filler ativo, diferentes tipos podem ser utilizados em materiais estabilizados por ligantes, como cimentos (não recomendado os de cura rápida), cal hidratada, cinza volante e escória de alto forno, sendo apenas alguns dos principais exemplos. Conforme o TG2 (SABITA, 2020), o objetivo de incorporar o filler ativo na BSM é melhorar a aderência do asfalto ao agregado, melhorar a dispersão da emulsão, reduzir o índice de plasticidade dos materiais naturais, aumentar a rigidez da mistura e a taxa de ganho de resistência, acelerar a cura da mistura compactada e auxiliar na ruptura da emulsão.

Porém, o comportamento de materiais estabilizados com ligante varia significativamente dependendo da qualidade do material não tratado e da quantidade de asfalto e carga ativa aplicada. Assim, a quantidade de cimento Portland deve ser limitada para evitar a diminuição da flexibilidade das misturas (YAN et al., 2017). Quando a adição é excessiva, o material se comporta mais como material tratado com cimento Portland e o benefício da adição de emulsão asfáltica é discutível. Por esta razão, essa adição é limitada a 1% em massa (BONFIM, 2021; SABITA, 2020; WIRTGEN GROUP, 2012).

Meneses, Vasconcelos e Bernucci (2022) demonstram que o tipo de filler, mesmo em pequenas porcentagens (1%), afeta o comportamento mecânico de misturas de asfalto reciclado a frio. A adição de um baixo teor de cimento Portland ou cal hidratada produz um comportamento semelhante ao de um material granular, com rigidez dependente do estado de tensões. Em níveis baixos de adição, a cal apresenta melhor desempenho em termos de aumento da rigidez e menor dependência da tensão confinante.

Com o cimento Portland dosado em baixas quantidades, os produtos de hidratação se dispersam no interior dos filmes de ligante asfáltico, aumentando a viscosidade da mistura e melhorando a resistência às deformações permanentes (GRAZIANI et al., 2016). Com o aumento do teor de cimento Portland, a estabilidade à umidade, a estabilidade em alta temperatura e a resistência das misturas recicladas à frio aumentam, enquanto a resistência à fissuração em baixa temperatura inicialmente aumenta e depois reduz (YAN et al., 2017).

Os mecanismos de cura não ocorrem imediatamente após a compactação, mas são graduais e podem levar semanas ou meses. Por exemplo, a taxa de quebra da emulsão asfáltica depende do tipo e conteúdo do emulsificante, do valor do pH dentro da mistura e da presença de partículas finas (ou seja, carga ou cimento Portland). Por outro lado, a taxa de perda de umidade está estritamente relacionada às condições de contorno das camadas recicladas, como temperatura e umidade relativa. Além disso, como as reações de hidratação do cimento Portland requerem a presença de água, o uso de cimento acelera o processo de cura da emulsão asfáltica por reduzir a quantidade de água livre (GRAZIANI et al., 2016).

ANÁLISE DO CICLO DE VIDA

A estrutura metodológica aplicada neste estudo segue os requisitos para uma análise do ciclo de vida, conforme proposto

pela norma técnica NBR ISO 14040 (ABNT, 2009). De acordo com a referida norma, a ACV enfoca os aspectos ambientais e os impactos ambientais potenciais (por exemplo, uso de recursos e as consequências de liberações para o meio ambiente) ao longo de todo o ciclo de vida de um produto, desde a aquisição das matérias-primas, produção, uso, tratamento pós-uso, reciclagem até a disposição final.

Um estudo de ACV é composto pela definição do objetivo e escopo, análise de inventário, avaliação dos impactos e interpretação dos resultados.

Para a realização da modelagem de análise de ciclo de vida e a obtenção dos impactos ambientais causados pela produção de BSM, utilizou-se o software de acesso livre openLCA v.2.0.3 em conjunto com a base de dados Ecoinvent 3.7.1. A Erro! Fonte de referência não encontrada. representa esquematicamente o cenário modelado, contendo os cinco fluxos de saída escolhidos no programa. Os fluxos 1 a 4 são equivalentes à produção dos materiais utilizados na mistura, enquanto o fluxo "X" equivale à mistura dos quatro produtos anteriores, resultando na BSM.

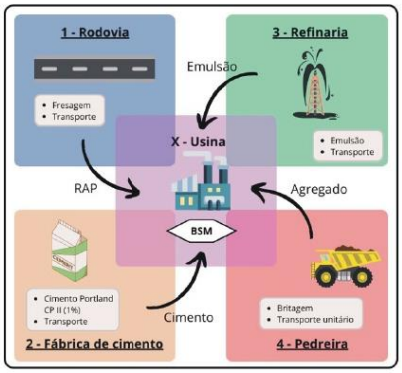


Figura 1. Esquema do fluxo de produção da BSM (AUTORES, 2024).

Escopo

Conforme os requisitos da NBR ISO 14040 (ABNT, 2009), e seguindo os fluxos designados pela ISO 21930 (2017), o escopo para estudo foi assim definido:

- Unidade declarada: 100 toneladas de BSM;
- Fronteiras do sistema: análise do berço ao portão (cradle-to-gate) com os módulos mandatórios para uma declaração ambiental de produto (DAP), conforme sugerido pela ISO 21930 (2017):
  - Materiais (A1): faz referência a extração e produção das matérias-primas;
  - Transporte (A2): indica o transporte destas matérias-primas até a usina;
  - Produção (A3): considera a energia despendida para a mistura das matérias-primas, dando origem ao produto BSM;
- Procedimentos de alocação: alocação de recursos em massa;
- Tipos de impactos avaliados: método ReCiPe Endpoint (H, A);
- Fonte de dados:
  - Foreground: traço das misturas, energia de equipamentos na usina e em campo e distâncias de transporte;
  - Background: base de dados Ecoinvent.

Construção do inventário

A ISO 21930 (2017) apresenta de forma esquemática as etapas genéricas do ciclo de vida de uma estrutura de pavimento. Neste estudo, o escopo foi delimitado nos módulos A1, A2 e A3, correspondentes a fase de produção dos materiais, mandatória para a publicação das DAP.

O módulo da matéria-prima (A1) corresponde à produção do RAP, cimento Portland, emulsão asfáltica e agregados; o módulo do transporte (A2) corresponde às distâncias percorridas pelas matérias-primas até a usina (campo-usina, refinaria-usina, fábrica de cimento-usina e pedreira- usina); e o módulo de produção (A3) corresponde à operação da usina para a produção da mistura de BSM.

As discriminações dos processos utilizados em cada fluxo de saída, bem como as quantidades, unidades e itens da base de dados, estão apresentados na Tabela 1.

O valor de consumo energético da operação de fresagem, constante na Tabela 1, foi calculado com base nas informações fornecidas pelo DNIT através do Sistema de Custos Referenciais de Obras (SICRO). A composição escolhida possui o código 4011479, denominada de "fresagem contínua de revestimento asfáltico", referente ao estado do Rio Grande do Sul para o mês de abril de 2023.

Quanto a energia para mistura da emulsão e da BSM, ambas foram calculadas com base em informações fornecidas por empresas brasileiras.

A quantidade de material foi calculada para a produção de 100 toneladas de BSM, cujo traço foi adaptado da pesquisa de Dias et al. (2023), dimensionado conforme metodologia TG2 para um pavimento brasileiro, e é composto de 43% de agregado virgem, 54% de RAP, 1% de cimento Portland e 2% de emulsão asfáltica (60% de ligante asfáltico e 40% de água).

No cenário modelado, considerou-se que a rodovia submetida ao processo de recomposição está localizada no

estado do Rio Grande do Sul. Para o cálculo das distâncias de transporte foram consideradas as principais empresas fornecedoras de materiais da região. Tomando como referência a usina da BSM, as distâncias consideradas até o campo (rodovia), fábrica de cimento Portland e distribuidora de emulsão asfáltica, são respectivamente de 50 km, 250 km e 280 km.

O cálculo da distância percorrida pela fresadora foi baseado em sua capacidade de fresagem. Um equipamento comumente utilizado em obras de reabilitação é capaz de realizar a fresagem de uma faixa de 1,00 m de largura e 20 cm de profundidade. Assim, é possível calcular o volume fresado em função da distância percorrida. O volume pode ser convertido para peso a partir do peso específico do RAP, equivalente a 2069 kg/m^3. Por fim, para o transporte da fresadora, admitiu-se um peso de 14 toneladas.

TABELA 1. DESCRIÇÃO DOS FLUXOS DE PRODUÇÃO DA BSM

Fluxo de saída	Fluxo de entrada	Qnt.	Un.	Módulo	Ecoinvent
RAP	Energia de fresagem	155,69	kWh	A1	Diesel, burned in building machine | diesel, burned in building machine | cut-off, U – GLO.
	Distância percorrida pela fresadora	3,51	t.km	A1	Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 | transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 | Cutoff, U – RoW.
	Transporte da fresadora (usina-campo + campo-usina)	1400	t.km	A2	Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 | transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 | Cutoff, U – RoW.
	Transporte do material fresado (campo-usina)	2700	t.km	A2	Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 | transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 | Cutoff, U – RoW.
Cimento	Cimento CP II	1,00	t	A1	Cement, limestone 6-10% | cement production, limestone 6-10% | cement limestone 6-10% | Cut-off U – BR
	Transporte (fábrica-usina)	250	t.km	A2	Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 | transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 | Cutoff, U – RoW.
Emulsão	Ligante asfáltico	2,90	t	A1	Pitch production, petroleum refinery operation | pitch | Cutoff, U – BR
	Água	1,33	t	A1	Tap water | tap water production, conventional treatment | tap water | Cut-off U-BR
	Energia para mistura	9,21	kWh	A3	Electricity voltage transformation from high to medium voltage | electricity, medium voltage | Cutoff, U - BR-Southern grid.
	Transporte (refinaria-usina)	933,33	t.km	A2	Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 | transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 | Cutoff, U – RoW.
Agregado	Britagem	43,00	t	A1	Gravel, crushed | gravel production, crushed | gravel crushed | Cutoff U – BR
	Transporte unitário dentro da usina	43,00	t.km	A2	Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 | transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 | Cutoff, U – RoW.
BSM	RAP	54,00	t	A1	Fluxo de saída – RAP.
	Cimento	1,00	t	A1	Fluxo de saída – Cimento.
	Emulsão	2,00	t	A1	Fluxo de saída – Emulsão.
	Agregado	43,00	t	A1	Fluxo de saída – Agregado.
	Energia para mistura	43,78	kWh	A3	Electricity voltage transformation from high to medium voltage | electricity, medium voltage | Cutoff, U - BR-Southern grid.

Avaliação dos Impactos

Para a avaliação dos impactos ambientais, utilizou-se o método ReCiPe endpoint (H, A), desenvolvido pelo National Institute for Public Health and Environment (HUIJBREGTS et al., 2017). O ReCiPe possui fatores de caracterização nos níveis midpoint e endpoint. No midpoint, os fatores de caracterização estão alocados entre a causa e o impacto observado, normalmente no ponto em que o mecanismo ambiental é idêntico para cada fluxo ambiental atribuído a essa categoria de impacto (GOEDKOOP et al., 2009). Os fatores de caracterização do endpoint refletem impactos nas três principais áreas de proteção: saúde humana, qualidade do ecossistema e escassez de recursos (HAUSCHILD e HUIJBREGTS, 2015).

Cada nível do ReCiPe pode ser avaliado a partir de três perspectivas culturais diferentes: Individualist (I), Hierarchist (H) e Egalitarian (E). A primeira visa o curto prazo, é otimista em relação à tecnologia, valoriza a iniciativa individual do mercado e considera a natureza como resiliente. A segunda considera a natureza como parcialmente tolerante, sendo um modelo de consenso comumente encontrado em estudos científicos. A terceira perspectiva trabalha no longo prazo, visa as necessidades do grupo acima das individuais e considera a natureza como frágil (HUIJBREGTS et al., 2017).

Neste trabalho optou-se pelo nível endpoint sob a perspectiva hierarquista média (H, A). Esta escolha foi feita em função de os resultados do endpoint serem expressos nas três principais áreas de proteção, de modo a facilitar o entendimento dos fatores de impacto do produto analisado. Ademais, a visão hierarquista foi escolhida por ser um consenso na comunidade científica.

No endpoint, a saúde humana é avaliada em anos de vida ajustados por incapacidade, equivalente a anos perdidos ou que uma pessoa está incapacitada devido a doenças ou acidentes; para a qualidade do ecossistema, a unidade utilizada é a perda local de espécies integrada ao longo do tempo (ano- espécie); para a escassez de recursos a unidade é o dólar, representante do custo adicional envolvido na extração futura de recursos fósseis e minerais.

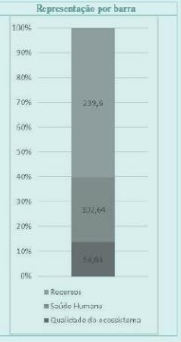
RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Tabela 2 consta a pontuação de impactos ambientais, para cada categoria, obtida a partir da análise de endpoint (H, A). A representação dos impactos por barras acumuladas, por grupo analisado, indica que o grupo mais impactado são os recursos naturais, seguido pela saúde humana e qualidade do ecossistema.

A categoria de recursos naturais engloba os recursos fósseis e minerais, os quais provocam impactos no aumento do custo de extração e custo de energia do óleo/gás/carvão (HUIJBREGTS et al., 2017). Conforme os dados apresentados na Tabela 2, 94% do dano nos recursos naturais é provocado pelo esgotamento de recursos fósseis. Esse resultado é esperado, visto que a maioria das atividades realizadas (transporte, mistura e fresagem) utilizam combustível fóssil como fonte de energia.

TABELA 2. IMPACTOS POR CATEGORIA - RECIPE ENDPOINT

Grupo	Categoria de impacto	Pontuação
Qualidade do ecossistema	Ocupação de terras agrícolas	2,08
	Mudanças climáticas, ecossistemas	41,63
	Ecotoxicidade de água doce	0,01
	Eutrofização de água doce	0,01
	Ecotoxicidade marinha	0,00
	Transformação natural de terras	7,61
	Acidificação terrestre	0,20
	Ecotoxicidade terrestre	0,17
	Ocupação urbana de terras	2,91
	Total	54,63
Saúde humana	Mudanças climáticas, saúde humana	65,87
	Toxicidade humana	3,09
	Radiação ionizante	0,11
	Depleção de ozônio	0,05
	Formação de material particulado	31,29
	Formação de oxidante fotoquímico	0,23
	Total	102,64
Recursos	Esgotamento de combustíveis fósseis	225,21
	Esgotamento de metais	14,39
	Total	239,60
Total geral		396,86



A categoria de saúde humana é composta pelos impactos de material particulado, formação/esgotamento da camada de ozônio, radiação ionizante, toxicidade humana, aquecimento global e uso d'água, que são agregados em termos de aumento de doenças respiratórias, câncer, desnutrição e outras doenças (HUIJBREGTS et al., 2017). Neste estudo, os indicadores mais afetados foram os de mudanças climáticas e formação de materiais particulados. Ambos relacionados direta ou indiretamente com a emissão de CO2 a partir da queima de combustíveis fósseis.

A categoria de qualidade do ecossistema é formada pelos impactos de aquecimento global, uso d'água, ecotoxicidade/ eutrofização d'água doce e marinha, formação da camada de ozônio, ecotoxicidade/acidificação terrestre, uso/transformação da terra, agregados em termos de dano a espécies de água doce, marinha e terrestre (HUIJBREGTS et al., 2017). Para a produção da BSM em análise, conforme apresentado na Tabela 2, os indicadores de maior impacto nesta categoria são as mudanças climáticas e a transformação natural de terras. Novamente, as mudanças climáticas estão ligadas à emissão de CO2. Com relação aos impactos de transformação, estes são provenientes da exploração de pedreiras e petróleo.

Conforme visto, a produção de gás carbônico está presente de diversas formas nos fluxos considerados para a produção da BSM. De acordo com a Tabela 1, existem seis atividades detransporte, cujo principal meio de poluição é a queima de diesel; para a produção do RAP há também a queima do diesel para o funcionamento da máquina fresadora; para o cimento, existe a emissão de CO2 pela queima do material no processo produtivo; e para a emulsão, na produção do ligante asfáltico, há a emissão de CO2 pela operação da refinaria de petróleo. Em todos estes casos há o esgotamento de recursos naturais, visto que o diesel e o ligante asfáltico são subprodutos do petróleo.

A Tabela 3 apresenta as quantidades de gás carbônico, em massa, geradas por categoria, conforme os resultados da simulação realizada neste estudo.

TABELA 3. EMISSÃO DE GÁS CARBÔNICO POR CATEGORIA

Fonte de emissão	CO2 (kg)	Porcentagem
Biogenética	89,78	3,8%
Fóssil	2250,29	95,8%
Transformação de terras	6,28	0,3%
Estoque de solo ou biomassa	1,43	0,1%
Total	2347,77	100%

A Tabela 3 corrobora o fato de os combustíveis fósseis serem um ponto crítico da BSM sob o ponto de vista ambiental. Essa fonte corresponde a 95,8% do total no processo produtivo do material. De acordo com as análises anteriores, o transporte de materiais é o modo mais frequente de combustão de recursos fósseis. Sendo assim, identifica-se o transporte de materiais como a principal fonte emissora de CO2 e principal meio gerador de impactos ambientais na produção da BSM analisada. Souza (2017) apresentou uma ACV para a avaliação da construção de pavimentos convencionais. Seus resultados ressaltaram que o transporte também desempenha um papel significativo nas emissões, corroborando com os resultados obtidos nesta pesquisa.

Para facilitar o entendimento das dimensões das emissões do produto, os resultados foram comparados com as emissões de veículos brasileiros. Um carro produz em média 191,4 g de CO2 por km percorrido (CARVALHO et al., 2017). A produção de 100 toneladas de BSM gera uma emissão total de 2347,77 kg de CO2. Assim, seria necessário que um veículo de passeio percorresse

12.266 km para equiparar as emissões de carbono com o processo produtivo de 100 toneladas deste material.

CONCLUSÕES

É importante salientar que uma análise de ciclo de vida é sensível ao contexto. Portanto, as conclusões obtidas são restritas ao cenário analisado, não sendo possível fazer generalizações, devido principalmente às distâncias de transporte específicas para cada região.

Os resultados demonstram que o esgotamento de combustíveis fósseis é o principal impacto ambiental do processo produtivo da BSM analisada. Dentre as diferentes fontes, identificou-se o transporte de materiais como o principal meio para a exaustão deste recurso. Ademais, a queima de combustíveis resulta na emissão de gás carbônico, levando à conclusão de que este é um dos fatores chave na análise de impactos ambientais da BSM.

Assim, as longas distâncias de transporte, presentes no

cenário modelado, são decisivas para os resultados observados. Porém, vale ressaltar que este é um cenário comum no dia a dia, visto que em muitos casos a rodovia a ser recuperada está distante da usina de BSM, fábrica de cimento e refinaria de emulsão. Um cenário ideal seria composto por um ambiente em que a usina, fábrica e refinaria estejam localizadas no mesmo lugar, havendo a necessidade apenas de transporte até o local de aplicação do material. Porém, entende-se que a configuração de locação destes pontos é uma condição pré-estabelecida, havendo dificuldades técnicas e operacionais para alteração. Portanto, como solução para mitigar os impactos ambientais, pode-se avaliar qual dos componentes da mistura de BSM apresentam maior momento de transporte para uma tentativa de otimização da dosagem da BSM, visando diminuir o impacto causado pelo transporte. Além disto, possíveis alternativas de longo prazo são a alternância para combustíveis oriundos de fontes renováveis, utilização de bioligantes ou a substituição da frota de veículos antigos por novos, menos poluentes. A simulação considerou veículos que seguem a norma Euro 5 de limite máximo de emissão de poluentes veiculares. Porém, sabe-se que já existem veículos no padrão Euro 6, com critérios de emissão ainda mais rigorosos e menos poluentes.

Como sugestão de trabalhos futuros, novos cenários podem ser avaliados, com enfoque em simular diferentes distâncias, visando quantificar a parcela de impacto do transporte, diferentes traços de BSM, procurando conciliar desempenho e proteção ambiental, e diferentes configurações de veículo, de forma a explorar a viabilidade da alteração da frota veicular. Além disso, é possível realizar simulações no nível midpoint, visando obter resultados quantitativos dos diversos poluentes envolvidos no processo.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq pela concessão das bolsas de estudo e produtividade respectivamente ao primeiro autor e à terceira autora, à CAPES pela bolsa de estudo do segundo autor, bem como ao Laboratório de Pavimentação da UFRGS, que permitiu a execução do estudo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR ISO 14040: Gestão ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Princípios e estrutura. Rio de Janeiro, 2009.

ARRA. Recommended Mix Design Guidelines for Full Depth Reclamation (FDR) Using Cement or Cement Kiln Dust (CKD) Stabilizing Agent FDR202. v. 60137, n. 630, 2016.

ARRA. Recommended Mix Design Guidelines for Cold Recycling Using Foamed (Expanded) Asphalt Recycling Agent (CR202). Asphalt Recycling & Reclaiming Association, v. 60137, n. 630, 2017.

ARRA. Recommended Mix Design Guidelines for Full Depth Reclamation (FDR) Using Emulsified Asphalt Stabilizing Agent FDR201A. v. 60137, n. 630, 2018.

BERNUCCI, L.B. et al. Pavimentação Asfáltica: Formação Básica para Engenheiros. 2ª ed. Rio de Janeiro: PETROBRAS: ABEDA, 2022.

BONFIM, V. Pavimento Sustentável. São Paulo: Exceção Editorial, 2021.

CARVALHO, A.L. et al. Diagnóstico das Emissões de CO2 a Partir dos Deslocamentos dos Estudantes da Universidade de Brasília. Revista Científica de Pesquisa Aplicada à Engenharia. 2017.

CHANDRA, R.; VEERARAGAVAN, A.; KRISHNAN, J.M. Evaluation of Mix Design Methods for Reclaimed Asphalt Pavement Mixes with Foamed Bitumen. Procedia - Social and Behavioral Sciences, v. 104, p. 2–11, dez. 2013.

DNIT – DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. Resolução nº 14/2021, de 08 de julho de 2021. Dispõe sobre o reaproveitamento do RAP (Reclaimed Asphalt Pavement) nas obras de restauração, adequação de capacidade e ampliação do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes – DNIT. Brasília/DF, 2021.

DIAS, C.R.C. et al. Bitumen Stabilized Materials as Pavement Overlay: Laboratory and Field Study. Construction and Building Materials, v. 369, 2023. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.130562.

FEDRIGO, W. Reciclagem de Pavimentos com Adição de Cimento Portland: Definição das Bases Para um Método de Dosagem. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2015.

GOEDKOOP, M. et al. ReCiPe 2008: A Life Cycle Impact Assessment Method Which Comprises Harmonised Category Indicators at The Midpoint and Endpoint Levels. 1ª ed. Report i: characterization. The Netherlands: Ruimte en Milieu, Ministerie van Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening en Milieubeheer, 2009.

GRAZIANI, A. et al. Effect of Curing on The Physical and Mechanical Properties of Cold-Recycled Bituminous Mixtures. Materials and Design, v. 95, p. 358–369, 2016.

GRILLI, A. et al. Análise Volumétrica de Misturas Asfálticas Recicladas a Frio Por Meio de Compactador Giratório. 21º Encontro de Asfalto. Rio de Janeiro, Brasil. 2014.

HAUSCHILD, M.Z.; HUIJBREGTS, M.A.J. Introducing Life Cycle Impact Assessment. In: Life Cycle Impact Assessment. Springer, 2015.

HUIJBREGTS, M.A.J. et al. ReCiPe2016: A Harmonised Life Cycle Impact Assessment Method at Midpoint and Endpoint Level. In: Life Cycle Assess 22, p. 138–147. 2017. https://doi.org/10.1007/s11367-016-1246-y.

ISO – INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 21930: Sustainability in Building Construction – Environmental Declaration of Building Products. Geneva, 2017.

MADRIGAL, D.P. et al. Effect of Mixing Time and Temperature on Cracking Resistance of Bituminous Mixtures Containing Reclaimed Asphalt Pavement Material. Journal of Materials in Civil Engineering. 2017. https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001831.

MENESES, J.P.C; VASCONCELOS, K.; BERNUCCI, L.L.B. Stiffness Assessment of Cold Recycled Asphalt Mixtures – Aspects Related to Filler Type, Stress State, Viscoelasticity, and Suction. Construction and Building Materials, v. 318, 2022. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.126003.

MONDAL, P.G.; KUNA, K.K. Mix Design Considerations for Foamed Bitumen Stabilized Materials: A Review. Construction and Building Materials, v. 326, fev., p. 126783, 2022.

MOREIRA, J., CORREIA, A.G.; PEREIRA, P.A. Contribuição Para a Reutilização de Material Fresado em Camadas Estruturais de Pavimento, 2006.

PERRATON, D. et al. Tests Campaign Analysis to Evaluate the Capability of Fragmentation Test to Characterize Recycled Asphalt Pavement (RAP) Material. In 8th RILEM international Symposium on Testing and Characterization of Sustainable and Innovative Bituminous Materials. p. 965–976. Dordrecht: Springer. 2016.

PRETI, F. et al. Application and Validation of The Cohesion Test to Characterize Reclaimed Asphalt Pavement. Road Materials and Pavement Design, 20(sup1), S434–S445. 2019.

SABITA. Technical Guideline (TG2): Bitumen Stabilised Materials Southern African Bitumen Association (Sabita). 3ª ed. 2020.

WIRTGEN GROUP. Reciclagem a Frio: Tecnologia de Reciclagem a Frio Wirtgen. 2012. Disponível em: <www.wirtgen.com>. Acesso em: abr. 2024.

YAN, J. et al. Early-Age Strength and Long-Term Performance of Asphalt Emulsion Cold Recycled Mixes With Various Cement Contents. Construction and Building Materials, v. 137, p. 153–159, 2017.

SOUZA, L. P. Uso Integrado das Ferramentas de Análise do Ciclo de Vida e de Análise do Custo do Ciclo de Vida em Pavimentação. 2017. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Engenharia de Transportes, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2017.

ANEXO XXIII

(Artigo: “ **MISTURAS DO TIPO BSM SUBMETIDAS À COMPACTAÇÃO VIBRATÓRIA: VARIAÇÃO DO PARÂMETRO ITS AO LONGO DE PROFUNDIDADE”** 38° Congresso de Pesquisa e Ensino de Transportes – ANPET – Florianópolis/SC Novembro 2024)

MISTURAS DO TIPO BSM SUBMETIDAS À COMPACTAÇÃO VIBRATÓRIA: VARIAÇÃO DO PARÂMETRO ITS AO LONGO DA PROFUNDIDADE

Daniel Wolter Martell
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Sul-rio-grandense
Washington Peres Núñez
Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Lélio Antônio Teixeira Brito
Universidade Federal do Rio Grande do Sul

RESUMO
Este estudo teve como objetivo avaliar a variação do parâmetro ITS ao longo da profundidade em corpos de prova de misturas do tipo BSM submetidas à compactação vibratória. Para alcançar tal objetivo, foram moldados corpos de prova 15x30cm, os quais foram serrados e divididos em três partes: terço superior, médio e inferior. Os corpos de prova foram submetidos a um processo de cura controlada, de acordo com as diretrizes constantes na metodologia de dosagem Sul-Africana. Os resultados obtidos permitem concluir que existe uma tendência de crescimento do parâmetro ITS com o aumento da profundidade. Tal fato indica que existe uma heterogeneidade considerável na estrutura interna de um mesmo corpo de prova, situação que pode afetar diversas propriedades das misturas tipo BSM quando da sua aplicação em campo.

ABSTRACT
This study aimed to evaluate the variation of the ITS parameter along depth in specimens of BSM mixtures subjected to vibratory compaction. To achieve this objective, 15x30cm specimens were molded, which were sawn and divided into three parts: upper, middle and lower third. The specimens were subjected to a controlled curing process, in accordance with the guidelines contained in the South African dosage methodology. The results obtained allow to conclude that there is a tendency for the ITS parameter to grow with the increasing of depth. This fact indicates that there is a considerable heterogeneity in the internal structure of the same specimen, a situation that can affect several properties of BSM mixtures when applied in the field.

1. INTRODUÇÃO

De acordo com a *Southern African Bitumen Association* (SABITA, 2020), materiais estabilizados com betume, também chamados BSMs – da sigla em inglês *Bitumen Stabilized Materials* – são materiais de pavimentação tratados com emulsão asfáltica ou espuma de asfalto. Metodologias de dosagem internacionais e especificações técnicas brasileiras levam em consideração, para fins de definição dos teores de projeto a serem adicionados nas misturas tipo BSM, a resistência à tração indireta (ITS – da sigla em inglês *Indirect Tensile Strength)*. Esse panorama revela a importância dessa propriedade na aplicação desse tipo de estabilização. No cenário nacional, o banco de dados disponível para o dimensionamento de pavimentos considerando a aplicação de misturas tipo BSM pode ser considerado precário. Diante dessa lacuna, o estudo do parâmetro ITS para essa classe de material parece oportuno.

Este estudo teve como objetivo avaliar a variação do parâmetro ITS ao longo da profundidade em corpos de prova de misturas do tipo BSM submetidas à compactação vibratória. Para alcançar tal objetivo, foram moldados corpos de prova 15x30cm, os quais foram serrados e subdivididos em três partes: terço superior, médio e inferior. Dessa forma, foi possível mapear a distribuição do parâmetro ITS ao longo da profundidade.

2. MATERIAIS

Foi empregada uma brita graduada simples de origem granítica. O RAP utilizado foi recolhido em um depósito localizado às margens da rodovia BR-290 (km 134). Foi adicionado às misturas cimento do tipo CP IV-32. Também foi aplicada uma emulsão asfáltica catiônica modificada

por polímeros elastoméricos de ruptura lenta, do tipo RL1C-E, indicada para reciclagem profunda de pavimentos. Maiores informações sobre a caracterização dos materiais constam nos trabalhos de Martell (2022), Martell e Núñez (2023).

3. MÉTODOS

3.1. Programa experimental

Foram utilizados dois conteúdos de RAP, iguais a 20% e 40%. Além do RAP, foi incorporada às misturas BGS. Os teores de emulsão adicionados foram determinados de acordo com a metodologia de dosagem Sul-Africana. Para mistura 80%BGS_20%RAP, foi incorporado um teor de emulsão de 3%, enquanto para mistura 60%BGS_40%RAP o teor acrescentado foi de 2,6%. Ambas as misturas receberam a incorporação de 1% de cimento. No total, foram rompidos 24 corpos de prova, sendo 12 de cada mistura.

3.2. Caracterização das misturas (RAP + BGS + cimento + emulsão)

As curvas granulométricas foram determinadas de acordo com o método de ensaio DNER-ME 083 (DNIT, 1998). As curvas de compactação foram obtidas seguindo o método de ensaio DNIT-ME 164 (DNIT, 2013), sendo aplicada a energia modificada. Tradicionalmente, a obtenção das curvas de compactação é feita mediante a adição de água. Entretanto, de acordo com o TG2 (SABITA, 2020), no caso das misturas tipo BSM estabilizadas com emulsão, deve ser preparado um fluido composto por 50% de água e 50% de emulsão, devido ao fato do ligante residual também ser considerado um fluido que contribui para o processo de compactação.

3.3. Preparação e compactação das amostras

As misturas foram produzidas de forma manual, buscando-se adotar o mesmo tempo de homogeneização quando cada um dos materiais era adicionado (2 a 3 minutos). Nessa etapa não foi feita a diluição da emulsão. O primeiro insumo a ser adicionado foi a água, seguido pelo cimento e, por fim, foi feito o acréscimo da emulsão. A definição da quantidade de água a ser incorporada foi feita respeitando-se o teor ótimo de fluido obtido nas curvas de compactação.
Os corpos de prova foram moldados em 10 camadas, empregando-se a compactação vibratória. Foi utilizado um martelo demolidor da marca Bosch, modelo GSH 11 VC, com uma potência nominal de 1700 W e uma energia de impacto de 23 J por golpe. O controle do tempo de compactação, o qual variou entre 20 e 60 segundos, foi feito mediante a aferição das alturas.

3.4. Cura controlada e serragem das amostras

Os corpos de prova foram submetidos a um processo de cura controlada de acordo com as diretrizes do TG2 (SABITA, 2020): os corpos de prova foram deixados nos moldes durante a noite, cobertos com pano úmido; na manhã seguinte, após serem removidos dos moldes, foram identificados e suas densidades aparentes determinadas; os corpos de prova foram então colocados em estufa a 40°C por 8 horas e, passado esse intervalo, foram removidos, colocados no interior de sacos plásticos vedados e recolocados na estufa a 40°C por 48 horas; depois das 48 horas, os corpos de prova foram colocados em sacos plásticos novos (secos), vedados e deixados sobre uma bancada até que fosse alcançada a temperatura de 25°C; após o resfriamento ser promovido por um período mínimo de 12 horas, os corpos de prova foram removidos dos sacos plásticos e pesados, restando concluído o processo de cura controlada.
Concluída a cura, os corpos de prova foram submetidos ao ensaio triaxial de módulo de resiliência, etapa que não faz parte do escopo deste trabalho. Após a realização desses ensaios, seguiu-se o processo de serragem das amostras. Os corpos de prova 15x30cm, com auxílio de

uma serra circular de corte, foram divididos em três partes. Sendo assim, foram produzidos "novos" corpos de prova (24 no total), correspondentes ao terço superior, médio e inferior, com dimensões aproximadas de 15x10cm. Após o processo de serragem, os corpos de prova 15x10cm foram colocados em uma estufa a 40°C por um período mínimo de 24 horas, a fim de promover a secagem do conjunto. Isso foi necessário pois, considerando que o processo de corte utiliza água, a superfície dos corpos de prova ficou umedecida.

3.5. Determinação da resistência à tração indireta

O ensaio para determinação da ITS foi executado de acordo com a normativa DNIT-ME 136 (DNIT, 2018), desenvolvido originalmente para misturas asfálticas.

4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

4.1. Caracterização das misturas

As curvas granulométricas das misturas são apresentadas na Figura 1. Considerando que as granulometrias se encontram dentro dos limites propostos pelo TG2 (SABITA, 2020), não foi necessário o procedimento de estabilização granulométrica.

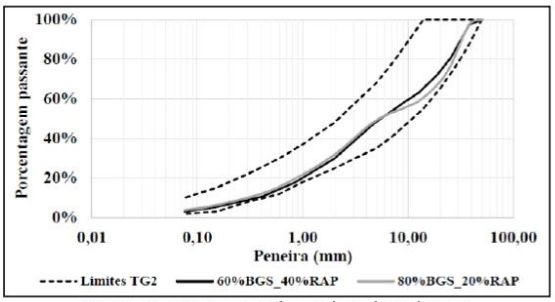


Figura 1: Curvas granulométricas das misturas

As curvas de compactação são exibidas na Figura 2. Destaca-se que a incorporação de RAP promoveu uma redução no $\gamma_{dmáx.}$ e na $w_{ót.}$ (umidade ótima). Com relação ao teor ótimo de fluido, a variação nos teores de RAP não promoveu influência significativa, talvez pelo fato de as curvas granulométricas exibirem considerável similaridade.

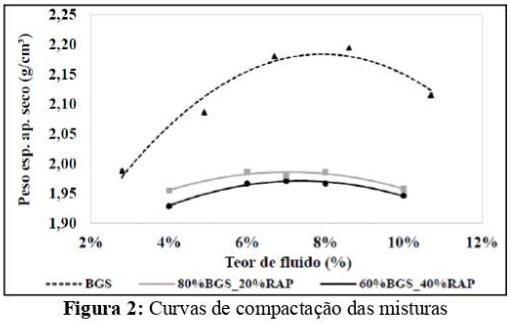


Figura 2: Curvas de compactação das misturas

Baseado no resultado do ensaio de compactação, foi possível definir os teores de fluido a serem acrescentados e, consequentemente, as quantidades de emulsão e água. No caso da mistura 80% BGS_20% RAP, o teor de fluido obtido foi de 7%, resultando em teores de emulsão e água de,

respectivamente, 3% e 4%. O $\gamma_{dmáx.}$ obtido foi de 1,985 g/cm³. Já para mistura 60% BGS_40% RAP, o teor de fluido resultante foi de 7,4%, sendo acrescentados teores de emulsão e água de, respectivamente, 2,6% e 4,8%. O $\gamma_{dmáx.}$ obtido foi de 1,970 g/cm³. Vale destacar que o teor de fluido corresponde ao somatório dos teores de emulsão e água.

4.2. Variação do parâmetro ITS ao longo da profundidade

A figura 3 exibe a distribuição da ITS ao longo da profundidade. Para fins de comparação, foi inserido o valor mínimo da ITS preconizado pelo TG2, considerando o processo de cura seca. Apenas o terço médio superior não alcançou o patamar mínimo recomendado.

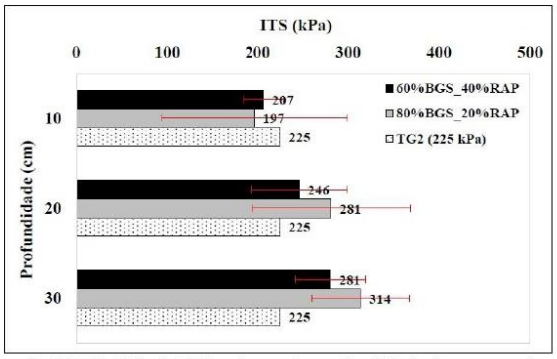


Figura 3: Distribuição da ITS ao longo da profundidade dos corpos de prova

Existe uma tendência de aumento do parâmetro ITS com o acréscimo da profundidade. Os terços superiores alcançaram os menores valores, enquanto os terços inferiores atingiram os resultados mais expressivos. Esse comportamento, seguido por ambas as misturas, pode ser explicado pelo fato de haver uma heterogeneidade na distribuição do índice de vazios (e%). Meneses (2022) refere que esse é um fenômeno a ser considerado quando a compactação é feita em camadas. É possível dizer que ocorre uma espécie de "compactação múltipla" nas camadas mais profundas pois elas recebem, mesmo que de forma reduzida, parte da energia empregada na compactação das camadas superiores. Conforme a profundidade diminui, o fenômeno da "compactação múltipla" também é reduzido, chegando à situação limite de a camada mais superficial receber apenas sua própria compactação, sem a influência da energia dissipada pela compactação das demais camadas. Dessa forma, é possível concluir que quanto maior a profundidade da camada, maior será a energia total por ela recebida, situação que pode explicar o crescimento da ITS em função das maiores densidades e menores e% alcançados.

Kuchiishi (2019), ao apresentar imagens de tomografia computadorizada de um corpo de prova compactado pelo método vibratório, percebeu que a camada mais superficial mostrou um maior e%, enquanto aquela mais profunda alcançou menores e%. Os resultados aqui obtidos vêm ao encontro das considerações feitas por esse autor, pois uma melhor densificação promove um acréscimo na ITS. Dessa forma, faz sentido que os terços superiores tenham obtido um pior desempenho, enquanto os terços inferiores tiveram sua performance alavancada.

A mistura 80%BGS_20%RAP apresentou uma variabilidade mais elevada nos resultados, fato que pode ser explicado em função da maior oscilação obtida nos graus de compactação. Ainda, é visível que a mistura 80%BGS_20%RAP atingiu um melhor desempenho, com exceção do terço superior (profundidade 0 a 10 cm). Mais uma vez, isso pode ser explicado pela melhor densificação promovida na mistura com menor percentual de RAP. Vale destacar que, enquanto a mistura 60%BGS_40%RAP alcançou um grau de compactação médio de 100,38%, o conjunto

de corpos de prova da mistura 80%BGS_20%RAP obteve 102,97%.
Por fim, os valores médios de ITS, considerando os terços superior, médio e inferior foram 245 kPa e 264 kPa, respectivamente, para as misturas 60%BGS_40%RAP e 80%BGS_20%RAP. Essa constatação verifica que ambas as misturas conseguiram alcançar o parâmetro mínimo ITS_{seca}, igual a 225 kPa, estabelecido pelo TG2 (SABITA, 2020).

5. CONCLUSÕES

As principais conclusões são destacadas a seguir: existe uma tendência de crescimento da ITS com o aumento da profundidade; os valores de ITS obtidos confirmaram que os teores de emulsão adicionados conseguiram promover o desempenho mínimo preconizado pelo TG2; existe uma variabilidade inerente no processo de compactação vibratória, a qual é difícil de ser eliminada e, embora esse seja o método empregado em campo, os autores gostariam de destacar que, do ponto de vista exclusivamente laboratorial, a compactação giratória tende a reduzir a variabilidade na etapa de moldagem, haja vista o monitoramento contínuo da altura e densidade dos corpos de prova realizado pelo equipamento giratório; a mistura 80%BGS_20%RAP alcançou os maiores valores de ITS, em função da sua melhor densificação.
Como maior contribuição deste estudo, os autores gostariam de destacar que existe uma heterogeneidade considerável na estrutura interna de um mesmo corpo de prova, situação que pode afetar diversas propriedades das misturas tipo BSM, inclusive quando da sua aplicação em campo. A compactação vibratória em camadas parece contribuir com esse cenário.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (1998) *Agregados – análise granulométrica*. Disponível em: https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/coletanea-de-normas/coletanea-de-normas/metodo-de-ensaio-me/dner-me083-98.pdf (acesso em 24/09/2024).

Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (2018) *Pavimentação asfáltica – Misturas asfálticas – Determinação da resistência à tração por compressão diametral – Método de ensaio*. Disponível em: https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/coletanea-de-normas/coletanea-de-normas/metodo-de-ensaio-me/dnit_136_2018_me-1.pdf (acesso em 24/09/2024).

Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (2013) *Solos – Compactação utilizando amostras não trabalhadas – Método de ensaio*. Disponível em: https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/coletanea-de-normas/coletanea-de-normas/metodo-de-ensaio-me/dnit_164_2013_me.pdf (acesso em 24/09/2024).

Kuchiishi, A. K. (2019) *Mechanical Behavior of Cold Recycled Asphalt Mixtures*. Dissertação (mestrado). Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo. DOI: 10.11606/D.3.2019.tde-23072021-151646.

Martell, D. W. (2022) *Reciclagem Profunda de Pavimentos Asfálticos com Emulsão: Aplicação da Metodologia de Dosagem Sul-Africana a Nível Nacional*. Dissertação (mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Construção e Infraestrutura, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. Disponível em: https://lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/262112/001171802.pdf?sequence=1&isAllowed=y (acesso em 24/09/2024).

Martell, D. W. e W. P. Núñez (2023) Dosagem de Misturas a Frio Recicladas com Emulsão: Aplicação da Metodologia Sul-Africana a Nível Nacional. *Anais do 25° Encontro Nacional de Conservação Rodoviária e 48ª Reunião Anual de Pavimentação*, p. 552-563. DOI: 10.29327/1304307.48-50.

Meneses, J. P. C. (2022) *Contributions to the Mix Design and Mechanical Behavior of Emulsion Stabilized Cold Recycled Asphalt Mixtures*. Tese (doutorado). Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo. DOI: 10.11606/T.3.2022.tde-28032022-131657.

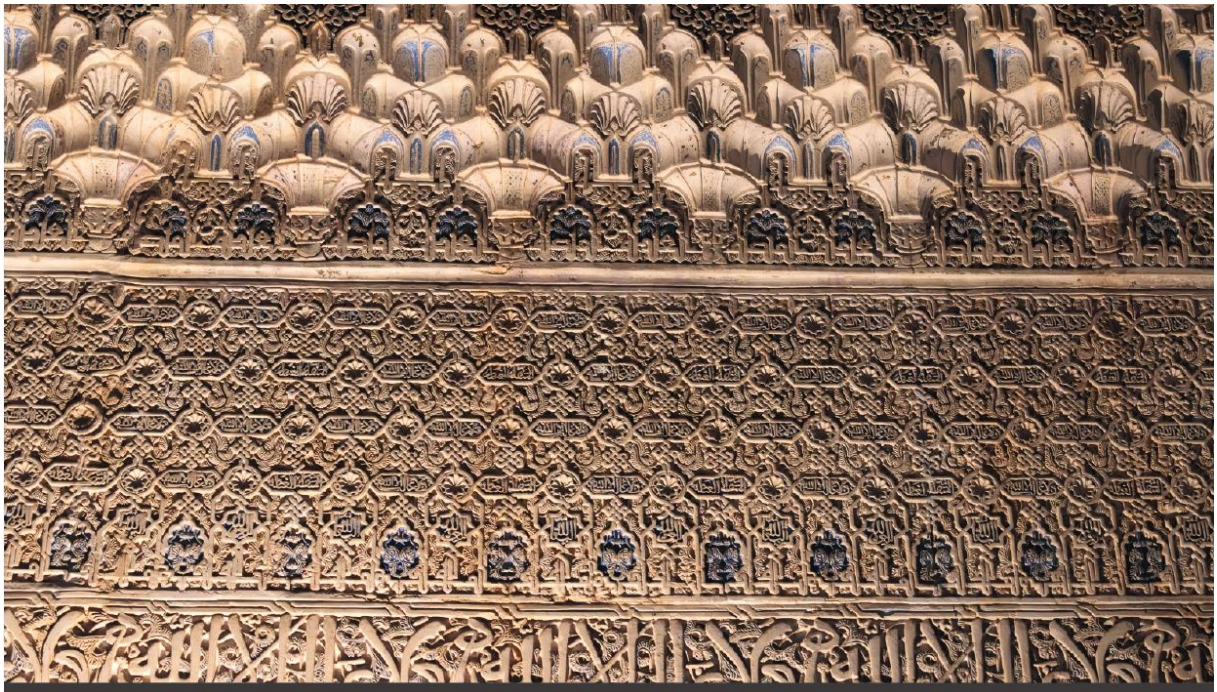
Southern African Bitumen Association (2020) *Technical Guideline: Bitumen Stabilised Materials*. Disponível em: https://www.sabita.co.za/wp-content/uploads/2020/08/tg2-august-2020.pdf (acesso em 24/09/2024).

Daniel Wolter Martell (danielmartell@ifsul.edu.br)
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Sul-rio-grandense, Campus Charqueadas
Rua General Balbão, 81, Centro, Charqueadas, RS, Brasil

ANEXO XXIV

(Artigo: "**IMPACTO DO TEMPO DE CURA NOS PARÂMETROS DE RESISTÊNCIA DE MISTURAS ESTABILIZADAS COM EMULSÃO ASFÁLTICA TIPO BSM"**

Memoria técnica del XXII CILA ISBN: 978-84-09-65558-8– Granada/Espanha)



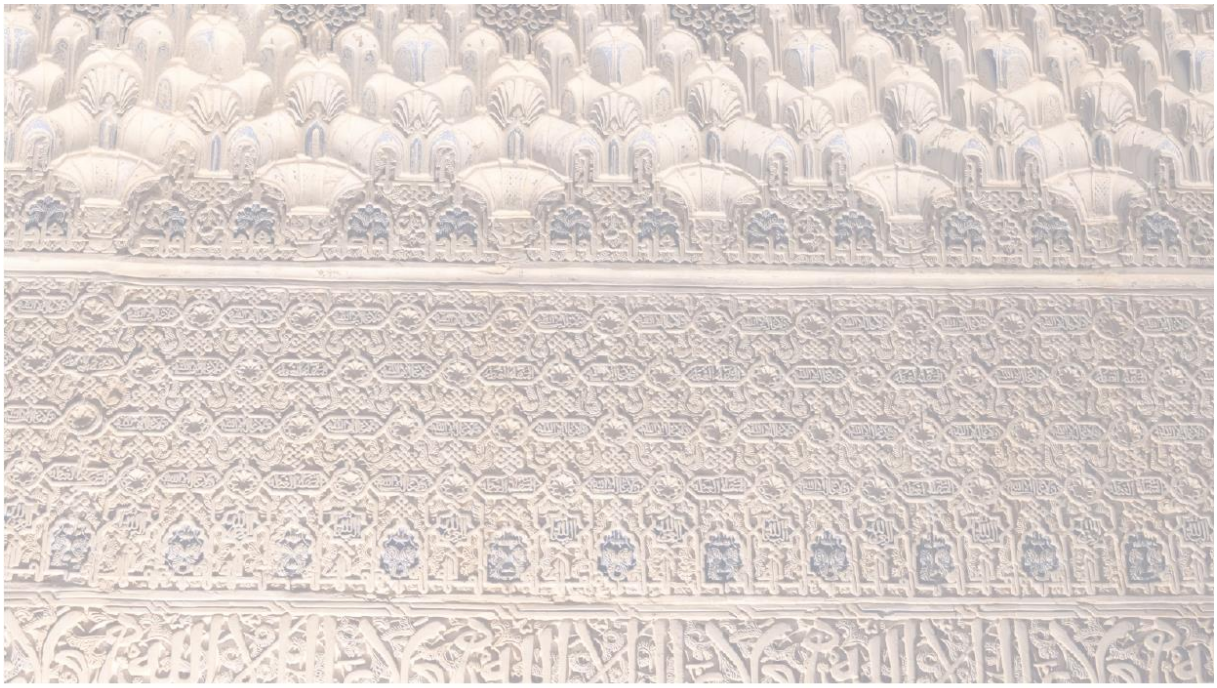
Memoria técnica

XXII CILA de Granada

XXIICILA
GRANADA, 22-26 ABRIL 2024

"Sostenibilidad, innovación y cultura en cada viaje"

15 de septiembre 2024



Fotografía tomada durante la vista a la Alhambra, 24 de abril 2024

Memoria técnica

XXII CILA de Granada

La Memoria técnica del XXII CILA recopila los textos de las más de cuatrocientas comunicaciones presentadas, desde más de veinticinco países. Este es uno de los cinco documentos que componen la Memoria del CILA: El XXII CILA en cifras, Memoria técnica, Memoria cultural, Memoria de actividades sociales y Memoria común compartida

XXIICILA
GRANADA, 22-26 ABRIL 2024

asefma
ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE FABRICANTES DE MEZCLAS ASFÁLTICAS

itafec

CILA

EDICIÓN:
Asociación Española de Fabricantes de Mezclas Asfálticas (Asefma)
Avenida General Perón 26, 2ºA
28020 Madrid

Instituto Técnico Avanzado de Ferias, Eventos y Congresos (itafec)
Calle Junta de Castilla León 3
28669 Boadilla del Monte, Madrid

ISBN: 978-84-09-65558-8

Madrid, septiembre de 2024

IMPACTO DO TEMPO DE CURA NOS PARÂMETROS DE RESISTÊNCIA DE MISTURAS ESTABILIZADAS COM EMULSÃO ASFÁLTICA TIPO BSM

Leonardo Lunkes Wagner[1], Marlova Grazziotin Johnston[2], Washington Peres Núñez[3] ,William Fedrigo[4], Cláudio Renato Castro Dias[5], Lélio Antônio Teixeira Brito[6]

[1] Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre/RS, Brasil, leonardo.lunkes@ufrgs.br
[2] Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre/RS, Brasil, marlova.johnston@ufrgs.br
[3] Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre/RS, Brasil, washington.nunez@ufrgs.br
[4] Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre/RS, Brasil, william.fedrigo@ufrgs.br
[5] Grupo Ecorodovias, São Paulo/SP, Brasil, claudio.dias@ecorodovias.com.br
[6] Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre/RS, Brasil, lelio.brito@ufrgs.br

Resumo

A utilização de técnicas de reciclagem a frio utilizando materiais estabilizados com emulsão asfáltica vem ganhando destaque em obras de recuperação de pavimentos no Brasil. A incorporação de RAP (Reclaimed Asphalt Pavement), com ou sem adição de agregados virgens, somada ao uso de cimento Portland e pequenas taxas de emulsão asfáltica, resultam em um material conhecido como *Bitumen Stabilized Material* (BSM). Estes materiais podem ser aplicados tanto a partir da reciclagem in situ, quanto com uso de usina, resultando em um material estabilizado com comportamento semelhante ao dos materiais granulares não ligados, mas com níveis de coesão significativamente aumentados e sensibilidade à umidade reduzida. No Brasil, ainda não há uma normativa nacional para a dosagem destes materiais. Lacunas quanto ao entendimento do ganho de resistência do material ao longo do tempo são relevantes neste contexto. Assim, este trabalho avaliou a resistência à tração indireta (ITS – *Indirect Tensile Strength*) de uma mistura tipo BSM composta por 32% de RAP, 67% agregado virgem, cimento Portland e 3,3% de emulsão asfáltica (ou 2% de asfalto residual). Foram moldados corpos de prova de 150 mm de diâmetro e 95 mm de altura seguindo a metodologia preconizada no TG2. Avaliou-se a influência de diferentes porcentagens de cimento, 0%, 1% e 2%, com cura padrão (72 horas em estufa a 40°Cseguido de 24 horas a temperatura ambiente) e diferentes tempos de cura para misturas compostas com 1% de cimento. Os resultados encontrados demonstram que o aumento do teor de cimento (0% até 2%) para o tempo de cura padrão não apresentou grandes ganhos expressivos de resistência. Já a variação do tempo de cura resulta em um aumento de resistência ao longo do tempo. Corpos de prova com 90 dias de cura ao ar obtiveram uma resistência na tração indireta 40% maior que corpos te prova curado em cura padrão.

Palavras-chave: Compactação Vibratória; BSM; Reciclagem.

1 Introdução

A busca por abordagens mais sustentáveis e ecologicamente corretas na pavimentação vem impulsionando o desenvolvimento de novas tecnologias para a sua construção, manutenção e reabilitação. Estas abordagens mais conscientes são oriundas das pressões ambientais que a indústria da construção como um todo exerce sobre o meio ambiente, levando ao esgotamento

dos recursos naturais, como por exemplo a utilização de agregados na construção dos pavimentos [1]. A indústria dos pavimentos busca a cada dia encontrar maneiras de ser mais sustentável e fazer a reutilização dos resíduos que são gerados [2], [3]. Ao tratar-se diretamente da construção de pavimentos, além da utilização de agregados, a utilização do CAP (cimento asfáltico de petróleo) gera impactos ao meio ambiente e à economia devido ao seu crescente aumento de preço. A substituição do agregado natural por agregado reciclado contribui para a sustentabilidade da construção civil [4].

A reciclagem de pavimentos asfálticos tanto por métodos a frio ou a quente auxiliam na recuperação do pavimento e na reincorporação de materiais que seriam muitas vezes descartados. A reciclagem de pavimento, utilizando técnicas a frio, como forma de reincorporar grandes quantidades de asfalto recuperado, traz benefícios econômicos e ambientais [2], [3], [5]. Diferentes técnicas de reciclagem a frio são encontradas no mercado, sendo uma delas a estabilização de materiais com cimento, cal, emulsão, entre outros ou a sua combinação. A determinação do tipo de reciclagem a frio ou a quente varia com relação a temperatura da mistura, podendo ocorrer tanto *in-plant* (em usinas especiais, onde o material é deslocado até o local onde ocorre a mistura) quanto *in-situ* (no próprio local da reciclagem)[1].

De modo geral, a reciclagem a frio envolve a mistura de agregados virgens juntamente com o Pavimento Asfáltico Recuperado, do inglês, Reclaimed Asphalt Pavement (RAP), à temperatura ambiente adicionando uma pequena quantidade de ligante asfáltico (emulsão/espuma) e material de enchimento ativo (cimento, cal ou afins) [1]. A mistura resulta em materiais estabilizados com betume, do inglês, Bitumen Stabilized Materials (BSMs) [6]. Os BSMs são usados principalmente em projetos de reabilitação de pavimentos onde o desgaste na estrutura do pavimento existente está restrito às camadas superiores. Assim, a maioria dos projetos de BSM realizados nas últimas duas décadas tem se preocupado com a reabilitação e melhoramento de pavimentos (reforço e/ou alargamento) onde o material in situ é reciclado.

A avaliação da ITS é importante pois a mesma corresponde ao método utilizado para dosagem. Por não se ter um consenso entre estudos e pesquisas internacionais sobre métodos de compactação e de cura e parâmetros de avaliação, é interessante avaliar o comportamento na ITS para variação dos tempos de cura e teores de cimento. Estudos similares foram desenvolvidos por Mollenhauer (2023) [5], no entanto limitados a 28 dias.

O presente trabalho teve por objetivo avaliar a resistência à tração indireta de misturas tipo BSM avaliando a variação do período de cura para até 90 dias e teor de cimento em corpos de prova cilíndricos de 150x95mm compactados usando compactador vibratório.

2 Reciclagem de Pavimentos e BSM – Bitumen Stabilized materials

A reciclagem de pavimentos é uma técnica de reabilitação de rodovias que busca a reutilização de materiais já envelhecidos reincorporando os mesmos como novas misturas, adicionando ou não agentes rejuvenescedores, agregados para a correção granulométrica e acréscimo de cimento, cal ou outro aditivo químico [7], [8]

A reutilização de materiais oriundos de reciclagem de pavimentos asfálticos e sua reincorporação nos próprios pavimentos em uma ou mais camadas que o compõem, de modo a melhorar a sua capacidade de carga, é objetivo de diversas pesquisas em todo o mundo. A utilização de agregados virgens, RAP, emulsão e material de enchimento, gera um material estabilizado com comportamento semelhante ao dos materiais granulares não ligados, mas com níveis de coesão significativamente aumentados e sensibilidade à umidade reduzida [6].

O material, após o tratamento com betume apresenta escurecimento na cor, onde o betume se dispersa apenas entre as partículas mais finas, resultando em uma argamassa rica em betume entre as partículas mais grossas. [6].

Os mecanismos de cura, no entanto, não ocorrem diretamente após a compactação, podendo levar semanas ou meses. Isso deve-se a quebra da emulsão, Ph da mistura e partículas finas [9]

3 Materiais e Métodos

A avaliação dos procedimentos de cura e do teor de cimento apresentados neste trabalho foi realizada por meio de análise dos resultados em ensaios de laboratório de resistência à tração indireta (ITS – Indirect Tensile Strength). Os procedimentos seguiram o preconizado no guia Sul Africano TG2 [6], com adaptações feitas a partir do mesmo para obter-se as variações necessárias para as análises.

3.1 Caracterização dos materiais

3.1.1 Agregados

Devido ao fresado não apresentar uma curva granulométrica que se enquadre nas faixas recomendadas pelo TG2, foi necessário realizar sua correção adicionando agregados minerais. Assim, utilizou-se agregados de origem granítica, provenientes da pedreira SBS, localizada em Capão do Leão, no Rio Grande do Sul. As propriedades dos agregados estão apresentadas na Tabela 1 e na Tabela 2.

Tabela 1. Caracterização dos agregados utilizados no estudo

Propriedade	Método	Especificação DNIT	Resultados		
			Brita 1 1/2"	Brita 3/4"	Pó de pedra
Índice de Forma	DNIT-ME 424/20 [10]	> 0,5	-	3,12	-
Equivalente de Areia	DNER-ME 054/97 [11]	≥ 55%	-	-	77%
Desgaste à Abrasão	DNER-ME 035/98 [12]	≤ 50%	24,76%	23,80%	-
Durabilidade pelo emprego de soluções de sulfato de sódio	DNER-ME 089/94 [13]	≤ 12%	-	-	-
Propriedade	Método	Especificação ABNT	Resultados		
			Brita 1 1/2"	Brita 3/4"	Pó de pedra
Adesividade à emulsão asfáltica	NBR 6300/2009 [14]	Satisfatório	-	Satisfatório	-
Adesividade à emulsão asfáltica	NBR 14249/2007 [15]	Satisfatório		Satisfatório	
Reatividade Azul de Metileno	NBR 14949/2017 [16]				2,5

Tabela 2. Massas específicas e absorção dos agregados utilizados no estudo

Propriedade	Método	Resultados		
		Brita 1 1/2"	Brita 3/4"	Pó de pedra
Massa Esp. Real- Agregado Graúdo (g/cm^3)	DNER-ME 081/98 [17]	2,628	2,645	-
Massa Esp. Real- Agregado Miúdo (g/cm^3)	DNER-ME 084/95 [18]	-	-	1,880
Massa Esp. Aparente do Grão (g/cm^3)	DNER-ME 081/98 [17]	2,605	2,576	-
Absorção (%)	DNER-ME 081/98 [17]	0,34	1,01	-

A composição granulométrica da BSM utilizada nesse estudo é composta por 32% de RAP, 39% de pó de Brita e 28% de Brita 1 ½", cimento e uma taxa de 2% de asfalto residual da emulsão. A Figura 1 apresenta a curva granulométrica obtida para a composição, com limites de faixas conforme o preconizado pelo TG2. A densidade obtida no ensaio de compactacao, usando a

energia modificada, foi de 2069 kg/m³ correspondente ao teor de umidade otimo de 7,9% e o equivalente de areia foi de 71,6%.

Realizou-se ensaios com 0%, 1% e 2% de cimento Portland do tipo CP II F classe 32 [19]. A sua composição é uma combinação de clinquer (71% - 94%), material pozolânico (6% - 14%) e material carbonático (0% - 15%).

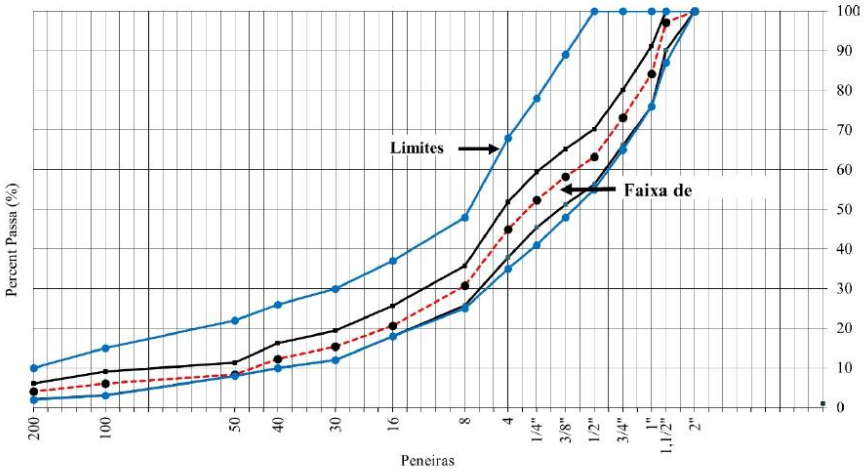


Figura 1. Composição granulométrica da BSM

Após realizada a secagem e o quarteamento do material, realizou-se a composição da mistura conforme indicado anteriormente. Devido à mistura apresentar entre 10% e 30% de material retido na peneira de 19 mm, realizou-se um procedimento de recomposição da mistura, conforme preconizado na NBR 6457 Amostras de Solo – Preparação para ensaio de compactação e ensaios de caracterização [20]. Assim, removeu-se os agregados da mistura retidos na peneira de 19,1 mm através da peneira de 76,2 mm, desprezando o material retido nesta última. O material da composição retido na peneira de 19,1 mm foi substituído por igual quantidade de material retido na peneira de 4,8 mm e que passante na peneira de 19,1 mm.

3.1.2 Emulsão asfáltica

A emulsão utilizada corresponde a uma emulsão EARP (Emulsão Asfáltica para Reciclagem Profunda) conforme as especificações da ANP [21]. A Tabela 3 apresenta as características da emulsão utilizada, fornecida pela distribuidora.

Tabela 3. Características da emulsão EARP

Ensaios sobre a emulsão	Método de ensaio IBP / ABNT	ESPECIFICAÇÃO		Resultado
		Mínima	Máxima	
Viscosidade Saybolt Furol, 50 C, s	NBR 14491 [22]	-	70	26
Sedimentação, 5 dias, % peso	NBR 6570 [23]	-	5	1,4
Peneiração, retido, 0.84mm, % peso	NBR 14393 [24]	-	0,1	0,01
Carga de partícula	NBR 6567 [25]	Positiva	-	Positiva
Resíduo Seco, % peso	NBR 14376 [26]	58	-	58,8

3.2 Mistura e compactação

Todo o material, antes de ser pesado nas porcentagens da mistura, foi completamente seco, onde os agregados virgens foram secos a 105 ± 2 °C e o RAP seco a 40 ± 2 °C. Após a pesagem, a composição foi mantida em estufa a 40 ± 2 °C, para garantir que o que o teor de água utilizado seria alcançado.

A mistura de cada corpo de prova foi realizada individualmente e manualmente a temperatura ambiente. O procedimento de mistura consistiu em realizar a mistura dos agregados virgens e RAP com o cimento, nas taxas de 0%, 1% e 2% em relação ao peso total dos agregados. Após era adicionada a água correspondente. O teor de água adicionado correspondeu ao teor ótimo de umidade obtido no ensaio de compactação descontando-se o teor de água da emulsão utilizada. Após adicionar a água, era adicionada a emulsão, sendo realizada a homogeneização do material até o completo recobrimento dos agregados. A Figura 2 apresenta uma mistura correspondente ao material após a homogeneização dos agregados com 2% de asfalto residual e 1% de cimento.



Figura 2: BSM homogeneizada

Após a mistura, os corpos de prova foram compactados em um molde tripartido por meio de um compactador vibratório de 23 J, com características conforme a Tabela 4 e Figura 3, com tempo de compactação limitado a 2 minutos. Utilizou-se um molde tripartido de 150 mm de diâmetro e 95 mm de altura, conforme o preconizado pelo TG2 [6]. Após a compactação, os corpos de prova foram retirados do molde e pesados.

Tabela 4. Dados compactador vibratório

Dados compactador vibratório	
Potencia Nominal Absorvida	1.700w
Energia de impacto	23 J
Dimensões da Ferramenta (Comprimento)	290 mm
Número máx. de impactos	900 - 1.700 i.p.m
Peso	11,4 kg
Dimensões da ferramenta (largura)	110 mm
Dimensões da ferramenta (Altura)	236 mm
Suporte da ferramenta	SDS máx.
Valores totais de vibração (Cinzelamento)	
Valor de emissão de vibração ah	8 m/s²
Incerteza K	1,5 m/s²
Cinzelamento	
Valor de emissão de vibração ah	8 m/s²
Incerteza K	1,5 m/s²



Figura 3. Compactador vibratório e molde tripartido

3.3 Condições de cura e teores de cimento

Um conjunto de 18 corpos de prova foram moldados com 0%, 1% e 2% de cimento, e submetidos a cura padrão conforme o TG2. Também, foram moldados mais 30 corpos de prova com teor de 1% de cimento, para avaliação de diferentes condições de cura. Os procedimentos de cura utilizados para esses conjuntos de corpos de prova foram cura padrão conforme o TG2, cura ao

ar até constância de massa, cura padrão + 30 dias ao ar a 25 °C, cura padrão + 60 dias ao ar a 25 °C e cura padrão + 90 dias ao ar a 25 °C. Salienta-se que após os períodos de cura, para cada conjunto de 6 corpos de prova, 3 foram rompidos para determinação da resistência à tração indireta (ITS) sob condição seca em temperatura ambiente e 3 corpos de provas rompidos após 24 horas submersos em água. A Figura 4 apresenta um corpo de prova com 1% de cimento após ser retirado do molde e após a cura padrão em estufa.



Após retirada das paredes do molde

Após 72 horas em estufa a 40°C

Figura 4: Corpo de prova após retirado do molde e após a cura padrão

Para se ter uma avaliação do comportamento do material frente a condições adversas, como mais um procedimento de cura, seis corpos de prova foram moldados com 1% de cimento, ao qual foram condicionados, conforme a norma DNIT 180/2018-ME [27] para determinação do Dano por Umidade Induzida (DUI).

A cura padrão, como aqui será denominada, é utilizado no manual TG2 [6], onde, uma vez extraídos os corpos de prova de seus respectivos moldes e marcados, são colocados em estufa a 40 °C (±1 °C) e período mínimo de 72 horas (3 dias). A cura das amostras para ITS produz a condição "Seca" para teste. Isso difere das amostras triaxiais. Após 72 horas, retirar as amostras da estufa e pesar cada uma, registrando a massa individual. Retornar todas as amostras ao forno a 40 °C por mais 4 horas e repetir o processo de pesagem. Se a massa de qualquer amostra diminuir em mais de 10 g, colocar todas as amostras novamente no forno por mais 24 horas. Este procedimento é repetido quantas vezes for necessário até que os corpos de prova atinjam massa constante.

A Figura 5 apresenta o ensaio de ITS sendo realizado. O equipamento utilizado aplica uma carga de 0,1kN á a mostra por meio de duas placas de carga, em aço temperado, 19 mm × 20 mm × 220 mm, com a face retificada de 19 ± 0,1 mm côncava com um raio de 76 ± 1 mm, juntamente com guias verticais da estrutura, 10 mm × 10 mm × 175 mm, de aço macio fixado a uma placa de base, de aço macio de projeto adequado para alinhar as placas de carga no corpo de prova. A amostra é carregada a uma taxa constante de 50 ± 5 mm/min até que a carga máxima seja atingida [6], [28] .



Figura 5: Realização do ensaio de ITS

4 Análises e Resultados

Todos os corpos de prova antes de serem ensaiados foram avaliados quanto a densidade e ao grau de compactação. Cada conjunto de seis corpos de prova, correspondente a um nível de cura para o ensaios de ITS na condição seca e úmida em triplicata, foram avaliados conforme o procedimento utilizado no TG2, considerando um outlier crítico de 1,822 para cada conjunto de seis amostras [6]. Referente ao grau de compactação, levando-se em consideração os outliers, todos os corpos de prova apresentaram valores entre 98% e 102%. Os corpos de prova que ficaram fora, destas duas avaliações, foram descartados, e novos corpos de prova foram moldados em substituição aos mesmos, e realizados novamente as verificações pertinentes.
O TG2 indica que os corpos de prova ensaiados para determinação da resistência à tração indireta devem apresentar valores mínimos conforme a Tabela 5. Para o presente trabalho, considerou-se que o material estudado corresponde a classe BSM1, que são materiais com alta resistência ao cisalhamento. Estes materiais são adequados para a construção da camada de base em pavimentos com uma capacidade estrutural superior a 3 milhões de ESALs (carga equivalente por eixo único) [29].

Tabela 5. Classificação dos BSM conforme a ITS

Classe	ITS (kPa)	
	Seco	Úmido
BSM 1	>225	>125
BSM 2	>175	>100

Fonte: Adaptado de [6]

4.1 Avaliação da ITS para diferentes teores de cimento

Após realizado o procedimento de moldagem, cura e compactação, os 3 conjuntos de 6 corpos de prova referentes aos teores de 0%, 1% e 2% de cimento foram ensaiados (três corpos de prova na condição de cura seca e três na condição de cura submersa).
A Figura 6 apresenta as médias obtidas para os diferentes teores de cimento. Observa-se que mesmo alterando os teores, não se obteve um aumento expressivo da resistência para a cura padrão de 72horas em estufa + 24 horas a 25 °C.

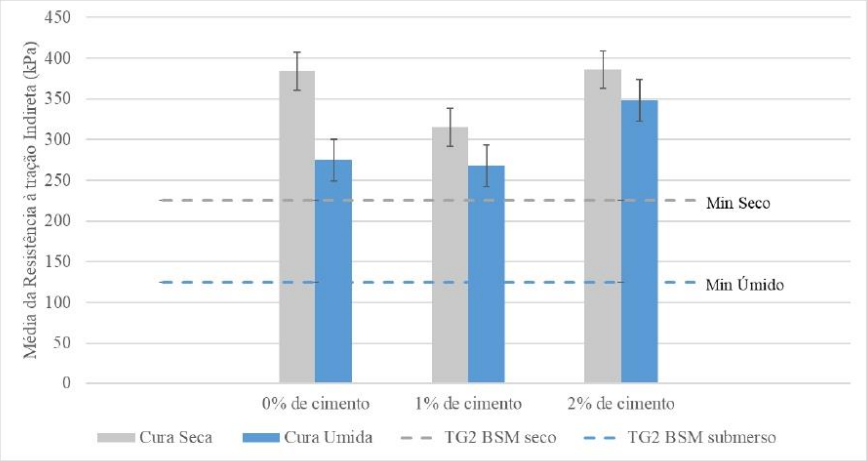


Figura 6: Resultados variação do teor de cimento em BSM

A opção de realizar os demais ensaios de variação de cura com 1% de cimento, deveu-se primeiramente por ser o teor indicado pelo TG2 como o teor limite de cimento a ser utilizado, bem como do cimento auxiliar na produção da mistura. Observou-se no procedimento de moldagem dos corpos de prova, que a utilização da taxa de 1% de cimento melhorou a trabalhabilidade da mistura, fazendo com que a água incorporada + emulsão adicionada, ficassem bem homogênea ao material.

4.2 Avaliação da ITS dos diferentes tempos de cura

A figura 7 apresenta a avaliação das variações do tempo de cura, para o material moldado com a taxa de 1% de cimento e 2% de emulsão residual. Observa-se que há um ganho da resistência à tração indireta ao longo do tempo. Observa-se que comparando a cura padrão com a cura após 90 dias, obteve-se um acréscimo de 40% na resistência à tração indireta.
Na avaliação adicional, referente ao DUI, observou-se que as resistências médias obtidas para o material foram elevadas na condição não condicionada. Já para a resistência média obtida para o ensaio após o condicionamento, observa-se que o material apresentou resistências menores quando comparada para curas de 30 dias, 60 dias e 90 dias. Referente a relação entre o ensaio condicionado e não condicionado obteve-se uma relação de 66%, ou seja, abaixo do esperado pelo TG2. No entanto, ainda assim, a mesma se apresenta bem acima do valor mínimo.
Para a cura realizada completamente ao ar, obteve-se a menor ITS, no entanto, mesmo assim, foi possível obter os valores mínimos preconizados pelo TG2, conforme a Tabela 5.

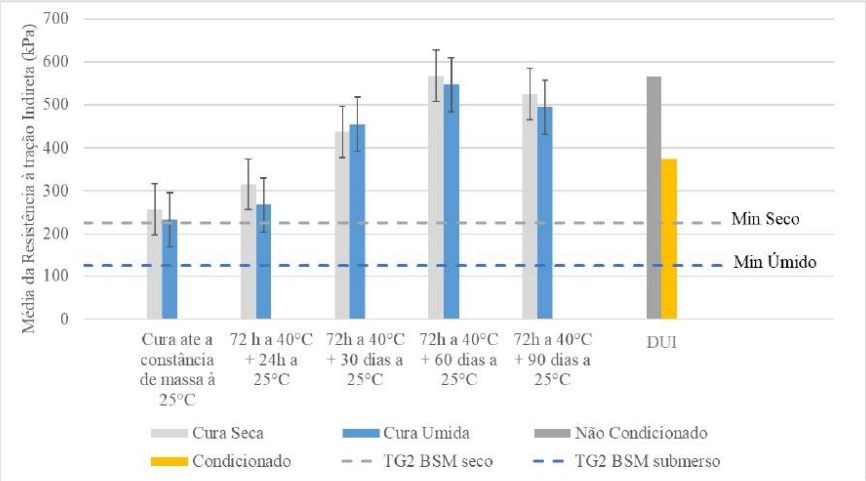


Figura 7: Avaliação do período de cura para a BSM

5 Conclusões

A busca por compreender o comportamento de misturas estabilizadas com emulsão asfáltica, ainda carece de estudos. A utilização deste material como bases de pavimentos torna-se interessante, pois possui resistências melhoradas pela estabilização do material.

No presente trabalho, avaliou-se a variação do teor de cimento em uma mistura estabilizada com 2% de ligante asfáltico residual (teor de emulsão de 3,34%), bem como a variação dos tempos e condições de cura para uma mistura com 2% de ligante asfáltico residual e taxa fixada de 1% de cimento.

Observou-se que teores crescentes de 0%, 1% e 2% de cimento não ocasionaram ganho expressivo de resistência, sendo que 0% de cimento apresentou uma resistência media maior que 1% de cimento. A utilização de taxas baixas de cimento é justificada pois a mesma auxilia na criação de pequenos pontos de coesão, na ruptura da emulsão e no ajuste granulométrico, sendo, no entanto, não preponderante para a cimentação da mistura. Optou-se por não utilizar taxas maiores do que 1% de cimento, justamente por se entender que o material não possui a característica de um material cimentado e sim um material granular com pontos de coesão aprimorados.

Referente a variação dos períodos de cura, ficou evidente que mesmo com taxas de cimento de 1% com relação ao peso total da amostra, há um ganho de resistência à tração indireta com o passar do tempo. Para a cura padrão consegue-se obter plenamente as resistência mínimas preconizados no TG2 [6], contudo, aos 90 dias se tem um acrescimento de 40% na resistência à tração indireta do mesmo material. ,

Ao ser submetido ao procedimento de cura para o dano por umidade induzida, a resistência obtida para a condição condicionada, foi superior tanto para a cura padrão úmida, quanto para a condição mínima preconizada.

Estas constatações sugerem que o material possui uma notável resistência a tração indireta, evidenciada pelo incremento de resistência ao longo do período avaliado. Também, conclui-se, que esses resultados indicam não apenas uma resposta positiva às condições adversas, mas também ressaltam o comportamento do material a diferentes protocolos de cura.

Agradecimentos

Os autores agradecem a à concessionária ECOSUL que forneceu o material para o estudo, parte de uma pesquisa RDT aprovada pela ANTT, bem como ao Laboratório de Pavimentação de UFRGS que permitiu a execução do estudo.

Referências Bibliográficas

[1] P. G. Mondal and K. K. Kuna, "Mix design considerations for foamed bitumen stabilized materials: A review," *Construction and Building Materials*, vol. 326. Elsevier Ltd, Apr. 04, 2022. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2022.126783.

[2] M. J. Martínez-Echevarría, R. M. Recasens, M. Del Carmen Rubio Gámez, and A. M. Ondina, "In-laboratory compaction procedure for cold recycled mixes with bituminous emulsions," *Constr. Build. Mater.*, vol. 36, pp. 918–924, Nov. 2012, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2012.06.040.

[3] C. Mignini, F. Cardone, and A. Graziani, "Complex modulus of cement-bitumen treated materials produced with different reclaimed asphalt gradations," *Mater. Struct. Constr.*, vol. 55, no. 7, Sep. 2022, doi: 10.1617/s11527-022-02009-4.

[4] M. J. Martinez-Echevarria *et al.*, "Crushing treatment on recycled aggregates to improve their mechanical behaviour for use in unbound road layers," *Constr. Build. Mater.*, vol. 263, Dec. 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.120517.

[5] K. Mollenhauer *et al.*, "Cold recycled asphalt for pavements with optimized resource and Cold recycled asphalt for pavements with optimized resource and energy efficiency : proposal for harmonized mix and pavement energy efficiency : proposal for harmonized mix and pavement desig," *Transp. Res. Procedia*, vol. 72, no. 2022, pp. 3031–3038, 2023, doi: 10.1016/j.trpro.2023.11.851.

[6] SABITA, *Technical Guideline (TG2) : Bitumen Stabilised Materials Southern African Bitumen Association (Sabita)*, 3°., no. August. 2020.

[7] W. Fedrigo, "RECICLAGEM DE PAVIMENTOS COM ADIÇÃO DE CIMENTO PORTLAND: DEFINIÇÃO DAS BASES PARA UM MÉTODO DE DOSAGEM," Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2015.

[8] L. B. Bernucci, L. M. G. da Motta, J. B. Soares, and J. A. P. Ceratti, *Pavimentação Asfáltica: Formação Básica para Engenheiros*, 2°. Rio de Janeiro: Petrobras, 2022.

[9] A. Graziani, C. Godenzoni, F. Cardone, and M. Bocci, "Effect of curing on the physical and mechanical properties of cold-recycled bituminous mixtures," *Mater. Des.*, vol. 95, pp. 358–369, 2016, doi: 10.1016/j.matdes.2016.01.094.

[10] DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT), "DNIT-ME 424: Pavimentação – Agregado – Determinação do índice de forma com crivos – Método de ensaio," p. 7, 2020.

[11] DNER - DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM, "DNER-ME 054: Equivalente de areia." pp. 01–10, 1997.

[12] DNER - DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM, "DNER-ME 035: Agregados - determinação da abrasão 'Los Angeles.'" 1998.

[13] DNER - DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM, "DNER-ME 089: Agregados - Avaliação da durabilidade pelo emprego de soluções de sulfato de sódio ou de magnésio." 1994.

[14] ABNT, "NBR 6300: Emulsões asfálticas catiônicas — Determinação da resistência à água (adesividade) em agregados graúdos Asphalt," *Associação Brasileira de Normas Técnicas*, vol. 16501. Rio de Janeiro, p. 4, 2009.

[15] ABNT, "NBR 14249 Emulsão asfáltica catiônica – Determinação expedita da resistência à água (adesividade) sobre agregados graúdos," p. 14249, 2007.

[16] ABNT, "NBR 14949: Microrrevestimentos asfálticos - Caracterização da fração fina por meio da absorção de azul de metileno .," *Assoc. Bras. Normas Técnicas*, p. 16, 2017.

[17] DNER - DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM, "DNER-

ME 081: Agregados - determinação da absorção e da densidade de agregado graúdo.," *Dnit*, pp. 01–06, 1998.
[18] DNER - DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM, "DNER-ME 084: Agregado miúdo - determinação da densidade real," *Agreg. miúdo - Determ. da densidade real*, pp. 93–95, 1995.
[19] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, "NBR 16697 - Cimento Portland - Requisitos." 2018.
[20] ABNT, "NBR 6457: Amostras de solo — Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização." Rio de Janeiro, p. 8, 2016.
[21] ANP, "CARACTERISTICAS DAS EMULSÕES ASFÁLTICAS PARA SERVIÇOS DE RECICLAGEM DE REVESTIMENTO, RECICLAGEM PROFUNDA E ESTABILIZAÇÃO." p. 2022, 2022.
[22] Associação Brasileira de Normas Técnicas, "ABNT NBR 14491: Emulsões asfálticas — Determinação da viscosidade Saybolt Fur," 2007.
[23] Associação Brasileira de Normas Técnicas, "ABNT NBR 6570 Ligantes asfálticos — Determinação da sedimentação e estabilidade à estocagem de emulsões asfálticas," *Assoc. Bras. Normas Técnicas*, p. 8, 2016.
[24] Associação Brasileira de Normas Técnicas, "ABNT NBR 14393: Emulsões asfálticas — Determinação da peneiração," *Assoc. Bras. Normas Técnicas*, p. 27, 2012.
[25] Associação Brasileira de Normas Técnicas, "ABNT NBR 6567 Ligantes asfálticos — Emulsões asfálticas — Determinação da carga de partícula," *Assoc. Bras. Normas Técnicas*, p. 8, 2015.
[26] Associação Brasileira de Normas Técnicas, "ABNT NBR 14376 Ligantes asfálticos — Determinação do teor do resíduo seco de emulsões asfálticas convencionais ou modificadas — Métodos expeditos," *Assoc. Bras. Normas Técnicas*, vol. 16501, p. 209, 2019.
[27] DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT), "Norma DNIT 180/2018-ME Pavimentação - Misturas asfálticas - Determinação do dano por umidade induzida – Método de Ensaio," *Dep. Nac. Infraestrutura Transp.*, p. 9, 2018.
[28] C. R. C. Dias *et al.*, "Bitumen stabilized materials as pavement overlay: Laboratory and field study," *Constr. Build. Mater.*, vol. 369, no. September 2022, 2023, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2023.130562.
[29] Wirtgen Group, *Reciclagem a frio: Tecnologia de reciclagem a frio Wirtgen*. 2012. [Online]. Available: www.wirtgen.com