ANTT – Agência Nacional de Transportes Terrestres RDT – Recurso de Desenvolvimento Tecnológico

# **RELATÓRIO FINAL**

## RESTAURAÇÕES DA CAMADA DE ROLAMENTO DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS VISANDO MAIOR DURABILIDADE E ATENDIMENTO DA TEXTURA SUPERFICIAL

**Régis Bittencourt** 

30/09/2019

# SUMÁRIO

LIS	STA DE TABELAS4
LIS	STA DE FIGURAS
1.	DESCRIÇÃO DO PROJETO18
1.1.	. Título
1.2.	. Resumo
1.3.	. Palavras-chave
1.4.	. Justificativa
1.5.	. Objetivos
1.6.	. Organização do trabalho
1.7.	. Período de execução
1.8.	. Cronograma de execução
1.9.	. Local de execução
1.10	0. Equipe executora
2.	MÉTODOS E TÉCNICAS UTILIZADAS 28
3.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA29
3.1.	. Influência dos agregados nas propriedades de misturas asfálticas
3.2.	. Textura superficial de misturas asfálticas com diferentes granulometrias
3.3.	. Diferenças no comportamento mecânico de misturas asfálticas do tipo gap-graded e
con	creto asfáltico
4.	ENSAIOS CONVENCIONAIS DE LABORATÓRIO38
4.1.	. Caracterização dos agregados
4.2.	. Dosagem das misturas asfálticas
4.3.	. Resistência à tração por compressão diametral (RT)
5.	TRECHO EXPERIMENTAL56
5.1.	. Construção do trecho experimental
5.2.	. Controle tecnológico da obra
6.	MONITORAMENTO DO TRECHO EXPERIMENTAL 68
6.1.	. Tráfego
6.2.	. Levantamento funcional
6.3.	. Levantamento da superfície77
6.4.	. Levantamento estrutural
6.5.	. Levantamento automatizado do trecho experimental

7.	ENSAIOS ESPECIAIS DE LABORATÓRIO 95	5
7.1.	Ligante asfáltico95	5
7.1.	2. Zona viscoelástica linear	7
7.1.	2. Obtenção dos parâmetros Superpave	9
7.1.	3. Curvas mestras	1
7.1.	4. Multiple stress creep recovery (MSCR)	2
7.1.	5. Linear amplitude sweep (LAS)	4
7.2.	Misturas asfálticas	5
7.2.	l. Rigidez	6
7.2.	2. Deformação permanente	2
7.2.	3. Fadiga	2
7.2.	4. Textura superficial	4
7.2.	5. Tomografia	1
8.	CONCLUSÕES, CONSIDERAÇÕES FINAIS E PRODUTOS 133	7
8.1.	Considerações finais	7
8.1.	Durabilidade	7
8.1.	2. Textura superficial	9
8.2.	Escolha da mistura asfáltica para restauração da camada de rolamento140	0
8.3.	Utilidade prática do projeto e desvantagens140	0
8.4.	Transferência de tecnologia e conhecimento dos produtos14	1
8.5.	Viabilidade econômica	1
<b>RE</b>	FERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS143	3
AN	EXOS149	9
APÍ	ÈNDICE	2

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1.</b> Teor de ligante para diferentes misturas (Vasconcelos et al., 2011)
Tabela 2. Classificação de microtextura (DNIT, 2006)  33
<b>Tabela 3.</b> Classificação de macrotextura (DNIT, 2006)
<b>Tabela 4.</b> Resultados da análise granulométrica dos agregados
Tabela 5. Caracterização dos agregados40
<b>Tabela 6.</b> Caracterização do ligante asfáltico (FLEXPAVE 60/85-E)
Tabela 7. Especificações para parâmetros de dosagem de concreto asfáltico (DNIT 031, 2006)
Tabela 8. Especificações para valores de VAM na dosagem de concreto asfáltico (DNIT 031,
2006)
<b>Tabela 9.</b> Porcentagem de agregados para composição das misturas asfálticas
<b>Tabela 10.</b> Especificações de granulometria para as misturas asfálticas48
Tabela 11. Parâmetros de dosagem das misturas asfálticas contínuas       51
Tabela 12. Parâmetros de dosagem das misturas asfálticas semi-descontínuas
<b>Tabela 13.</b> Parâmetros de dosagem da mistura asfáltica aberta52
Tabela 14. Parâmetros de dosagem da mistura asfáltica descontínua
Tabela 15. Levantamento deflectométrico na rodovia para determinação do local do trecho
experimental
Tabela 16. Levantamento de defeitos na rodovia para determinação do local do trecho
experimental
Tabela 17. Descrição e ordem de execução das misturas asfálticas no trecho experimental58
<b>Tabela 18.</b> Teor de ligante asfáltico pelo método da ignição63
Tabela 19. Teor de finos das misturas asfálticas  64
<b>Tabela 20.</b> Gmb das misturas de acordo com o laboratório e comparação com o projeto65
<b>Tabela 21.</b> Valores de Gmm obtidos em laboratório e de projeto
<b>Tabela 22.</b> Valores de VVs obtidos em laboratório e de projeto
Tabela 23. Datas de monitoramento do trecho experimental
Tabela 24. Cálculos dos fatores de equivalência de carga (FECs)
<b>Tabela 25.</b> Valores de VVs e CAP obtidos em laboratório e de projeto
<b>Tabela 26.</b> Classificação da macrotextura de uma superfície de pavimento
Tabela 27. Classificação da macrotextura dos segmentos do trecho experimental
<b>Tabela 28.</b> Classificação da microtextura de uma superfície de pavimento

Tabela 29. Classificação da microtextura de cada segmento do trecho experimental
<b>Tabela 30.</b> Valores de VVs e CAP obtidos em laboratório e de projeto
Tabela 31. Classificação do tráfego de acordo com o Superpave     103
Tabela 32. Matriz de amostras fabricadas  113
Tabela 33. Dados de obtidos pela tomografia de uma amostra
Tabela 34. Ensaio de verificação da zona viscoelástica linear em amostra não-envelhecida 183
Tabela 35. Ensaio de verificação da zona viscoelástica linear em amostra envelhecida em RTFOT
Tabela 36. Ensaio de verificação da zona viscoelástica linear em amostra envelhecida em PAV
Tabela 37. Ensaio de obtenção das propriedades reológicas em amostra não-envelhecida (amostra 01)
Tabela 38. Ensaio de obtenção das propriedades reológicas em amostra não-envelhecida (amostra
02)
Tabela 39. Ensaio de obtenção das propriedades reológicas em amostra envelhecida em RTFOT
(amostra 01)
Tabela 40. Ensaio de obtenção das propriedades reológicas em amostra envelhecida em RTFOT
(amostra 02)
Tabela 41. Ensaio de obtenção das propriedades reológicas em amostra envelhecida em PAV
(amostra 01)
<b>Tabela 42.</b> Ensaio de obtenção das propriedades reológicas em amostra envelhecida em PAV(amostra 02)
Tabela 43. Ensaio de multiple-stress creep recovery (MSCR): temperatura de 64°C (amostra 01)       192
Tabela 44. Ensaio de multiple-stress creep recovery (MSCR): temperatura de 64°C (amostra 02)       193
Tabela 45. Ensaio de multiple-stress creep recovery (MSCR): temperatura de 70°C (amostra 01)       194
Tabela 46. Ensaio de multiple-stress creep recovery (MSCR): temperatura de 70°C (amostra 02)       195
Tabela 47. Ensaio de multiple-stress creep recovery (MSCR): temperatura de 76°C (amostra 01)       196
Tabela 48. Ensaio de multiple-stress creep recovery (MSCR): temperatura de 76°C (amostra 02)       107

Página 5 de 285

Tabela 49. Ensaio de multiple-stress creep recovery (MSCR): temperatura de 82°C (amostra 01) Tabela 50. Ensaio de multiple-stress creep recovery (MSCR): temperatura de 82°C (amostra 02) Tabela 52. Ensaio de linear amplitude sweep (LAS): temperatura de 20°C (amostra 01)...... 201 Tabela 53. Ensaio de linear amplitude sweep (LAS): temperatura de 20°C (amostra 02)...... 202 Tabela 54. Ensaio de linear amplitude sweep (LAS): temperatura de 25°C (amostra 01)...... 203 Tabela 55. Ensaio de linear amplitude sweep (LAS): temperatura de 25°C (amostra 02)...... 204 Tabela 56. Ensaio de linear amplitude sweep (LAS): temperatura de 30°C (amostra 01)...... 205 Tabela 57. Ensaio de linear amplitude sweep (LAS): temperatura de 30°C (amostra 02)...... 206 Tabela 61. Ensaio de mancha de areia em laboratório nos ciclos de simulação de tráfego (0 ciclos) Tabela 62. Ensaio de mancha de areia em laboratório nos ciclos de simulação de tráfego (3.000 Tabela 63. Ensaio de mancha de areia em laboratório nos ciclos de simulação de tráfego (10.000 Tabela 64. Ensaio de mancha de areia em laboratório nos ciclos de simulação de tráfego (30.000 Tabela 66. Ensaio de pêndulo britânico em laboratório nos ciclos de simulação de tráfego (30.000 Tabela 68. Ensaio de mancha de areia no trecho experimental - segmento 1 (CA): 0 meses .. 233 Tabela 69. Ensaio de mancha de areia no trecho experimental – segmento 2 (CA+): 0 meses 233 Tabela 70. Ensaio de mancha de areia no trecho experimental - segmento 3 (CA-): 0 meses. 233 **Tabela 71.** Ensaio de mancha de areia no trecho experimental – segmento 5 (SEMI): 0 meses Tabela 72. Ensaio de mancha de areia no trecho experimental – segmento 6 (SEMI+): 0 meses 

Tabela 73. Ensaio de mancha de areia no trecho experimental – segmento 7 (SEMI-): 0 meses
Tabela 74. Ensaio de mancha de areia no trecho experimental – segmento 8 (GAP): 0 meses 235
<b>Tabela 75.</b> Ensaio de mancha de areja no trecho experimental – segmento 1 (CA): 4 meses 236
<b>Tabela 76.</b> Ensaio de mancha de areia no trecho experimental – segmento 2 (CA+): 4 meses 236
<b>Tabela 77.</b> Ensaio de mancha de areia no trecho experimental – segmento 3 (CA-): 4 meses. 236
<b>Tabela 78.</b> Ensaio de mancha de areia no trecho experimental – segmento 5 (SEMI): 4 meses
<b>Tabela 79.</b> Ensaio de mancha de areia no trecho experimental – segmento 6 (SEMI+): 4 meses
Tabala 80 Ensaio de mancha de areia no trecho experimental segmento 7 (SEMI): A meses
<b>Tabela 60.</b> Elisalo de manena de areia no treeno experimental – segmento 7 (SEMI-). 4 meses
<b>Tabela 81.</b> Ensaio de mancha de areia no trecho experimental – segmento 8 (GAP): 4 meses 238
<b>Tabela 82.</b> Ensaio de mancha de areia no trecho experimental – segmento 1 (CA): 12 meses 239
<b>Tabela 83.</b> Ensaio de mancha de areia no trecho experimental – segmento 2 (CA+): 12 meses
<b>Tabela 84.</b> Ensaio de mancha de areia no trecho experimental – segmento 3 (CA-): 12 meses240
Tabela 85. Ensaio de m 241
<b>Tabela 86.</b> Ensaio de mancha de areia no trecho experimental – segmento 5 (SEMI): 12 meses
<b>Tabela 87.</b> Ensaio de mancha de areia no trecho experimental – segmento 6 (SEMI+): 12 meses
Tabela 88. Ensaio de mancha de areia no trecho experimental – segmento 7 (SEMI-): 12 meses
Tabela 89. Ensaio de mancha de areia no trecho experimental – segmento 8 (GAP): 12 meses
Tabela 90. Ensaio de pêndulo britânico no trecho experimental – segmento 1 (CA): 0 meses 244
Tabela 91. Ensaio de pêndulo britânico no trecho experimental – segmento 2 (CA+): 0 meses
Tabela 92. Ensaio de pêndulo britânico no trecho experimental – segmento 3 (CA-): 0 meses
Tabela 93. Ensaio de pêndulo britânico no trecho experimental – segmento 4 (CPA): 0 meses

Tabela 94. Ensaio de pêndulo britânico no trecho experimental – segmento 5 (SEMI): 0 meses
Tabela 95. Ensaio de pêndulo britânico no trecho experimental – segmento 6 (SEMI+): 0 meses
Tabela 96. Ensaio de pêndulo britânico no trecho experimental – segmento 7 (SEMI-): 0 meses
Tabela 97. Ensaio de pêndulo britânico no trecho experimental - segmento 8 (GAP): 0 meses
Tabela 98. Ensaio de pêndulo britânico no trecho experimental – segmento 1 (CA): 4 meses 248
Tabela 99. Ensaio de pêndulo britânico no trecho experimental - segmento 2 (CA+): 4 meses
Tabela 100. Ensaio de pêndulo britânico no trecho experimental – segmento 3 (CA-): 4 meses
Tabela 101. Ensaio de pêndulo britânico no trecho experimental – segmento 4 (CPA): 4 meses
<b>Tabela 102.</b> Ensaio de pêndulo britânico no trecho experimental – segmento 5 (SEMI): 4 meses
<b>Tabela 103.</b> Ensaio de pêndulo britânico no trecho experimental – segmento 6 (SEMI+): 4 meses
<b>Tabela 104.</b> Ensaio de pêndulo britânico no trecho experimental – segmento 7 (SEMI-): 4 meses
<b>Tabela 105.</b> Ensaio de pêndulo britânico no trecho experimental – segmento 8 (GAP): 4 meses
<b>Tabela 106</b> . Ensaio de pêndulo britânico no trecho experimental – segmento 1 (CA): 12 meses
251
<b>Tabela 107</b> Ensaio de pândulo britânico no trecho experimental segmento $2(CA+)$ : 12 meses
<b>Tabela 107.</b> Elisalo de pendulo ortanico no treeno experimental – segmento 2 (CA+). 12 meses
Tabala 108 Engaio da nândula britânica na tracha avnarimental   segmente 2 (CA): 12 magaz
<b>Tabela 108.</b> Ensalo de pendulo ofitanico no trecho experimental – segmento 5 (CA-): 12 meses
= 253
<b>1 adeia 109.</b> Ensaio de pendulo britanico no trecho experimental – segmento 4 (CPA): 12 meses
Tabela 110. Ensaio de pendulo britânico no trecho experimental – segmento 5 (SEMI): 12 meses

Tabela 111. Ensaio de pêndulo britânico no trecho experimental – segmento 6 (SEMI+): 12 meses
Tabela 112. Ensaio de pêndulo britânico no trecho experimental – segmento 7 (SEMI-): 12 meses
Tabela 113. Ensaio de pêndulo britânico no trecho experimental – segmento 8 (GAP): 12 meses
Tabela 114. Ensaio de afundamento em trilha de roda com treliça no trecho experimental -
segmento 1 (CA): 4 meses
Tabela 115. Ensaio de afundamento em trilha de roda com treliça no trecho experimental -
segmento 2 (CA+): 4 meses
Tabela 116. Ensaio de afundamento em trilha de roda com treliça no trecho experimental -
segmento 3 (CA-): 4 meses
Tabela 117. Ensaio de afundamento em trilha de roda com treliça no trecho experimental -
segmento 4 (CPA): 4 meses
Tabela 118. Ensaio de afundamento em trilha de roda com treliça no trecho experimental -
segmento 5 (SEMI): 4 meses
Tabela 119. Ensaio de afundamento em trilha de roda com treliça no trecho experimental -
segmento 6 (SEMI+): 4 meses
Tabela 120. Ensaio de afundamento em trilha de roda com treliça no trecho experimental -
segmento 7 (SEMI-): 4 meses
Tabela 121. Ensaio de afundamento em trilha de roda com treliça no trecho experimental -
segmento 8 (GAP): 4 meses
Tabela 122. Ensaio de afundamento em trilha de roda com treliça no trecho experimental -
segmento 1 (CA): 12 meses
Tabela 123. Ensaio de afundamento em trilha de roda com treliça no trecho experimental -
segmento 2 (CA+): 12 meses
Tabela 124. Ensaio de afundamento em trilha de roda com treliça no trecho experimental -
segmento 3 (CA-): 12 meses
Tabela 125. Ensaio de afundamento em trilha de roda com treliça no trecho experimental -
segmento 4 (CPA): 12 meses
Tabela 126. Ensaio de afundamento em trilha de roda com treliça no trecho experimental -
segmento 5 (SEMI): 12 meses
Tabela 127. Ensaio de afundamento em trilha de roda com treliça no trecho experimental -
segmento 6 (SEMI+): 12 meses

Tabela 128. Ensaio de afundamento em trilha de roda com treliça no trecho experimental -Tabela 129. Ensaio de afundamento em trilha de roda com treliça no trecho experimental -Tabela 131. Ensaio visual para obtenção de área trincada – segmento 2 (CA+): 4 meses ...... 267 Tabela 132. Ensaio visual para obtenção de área trincada – segmento 3 (CA-): 4 meses ....... 267 Tabela 133. Ensaio visual para obtenção de área trincada – segmento 4 (CPA): 4 meses ...... 267 Tabela 134. Ensaio visual para obtenção de área trincada – segmento 5 (SEMI): 4 meses..... 268 Tabela 135. Ensaio visual para obtenção de área trincada – segmento 6 (SEMI+): 4 meses ... 268 Tabela 136. Ensaio visual para obtenção de área trincada – segmento 7 (SEMI-): 4 meses .... 268 Tabela 137. Ensaio visual para obtenção de área trincada – segmento 8 (GAP): 4 meses ...... 268 Tabela 138. Ensaio visual para obtenção de área trincada - segmento 1 (CA): 12 meses...... 269 Tabela 139. Ensaio visual para obtenção de área trincada - segmento 2 (CA+): 12 meses ..... 269 **Tabela 140.** Ensaio visual para obtenção de área trincada – segmento 3 (CA-): 12 meses ..... 269 Tabela 141. Ensaio visual para obtenção de área trincada - segmento 4 (CPA): 12 meses ..... 269 Tabela 142. Ensaio visual para obtenção de área trincada - segmento 5 (SEMI): 12 meses.... 269 Tabela 143. Ensaio visual para obtenção de área trincada – segmento 6 (SEMI+): 12 meses . 270 Tabela 144. Ensaio visual para obtenção de área trincada - segmento 7 (SEMI-): 12 meses .. 270 Tabela 145. Ensaio visual para obtenção de área trincada - segmento 8 (GAP): 12 meses ..... 270 Tabela 146. Ensaio de irregularidade longitudinal (IRI) no trecho experimental: 0 meses ...... 271 Tabela 147. Ensaio de irregularidade longitudinal (IRI) no trecho experimental: 5 meses ...... 274 Tabela 148. Ensaio de irregularidade longitudinal (IRI) no trecho experimental: 6 meses ...... 277 Tabela 149. Ensaio de irregularidade longitudinal (IRI) no trecho experimental: 8 meses ...... 280 Tabela 150. Ensaio de irregularidade longitudinal (IRI) no trecho experimental: 12 meses .... 283

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Aspectos de misturas asfálticas com granulometria: (a) densa, (b) aberta e (c)
descontínua (Fonte: Pavement Engineering)
Figura 2. Pilhas de agregados na pedreira: (a) brita 3/4", (b) pedrisco e (c) pó de pedra
Figura 3. Granulometrias dos agregados coletados na pedreira
Figura 4. Esquema da massa específica de agregados: (a) real e (b) aparente40
Figura 5. Paquímetro especial para medição de lamelaridade (ARTERIS D 4791): (a)
consideração do comprimento e (b) consideração da espessura
Figura 6. Temperaturas de usinagem e compactação da mistura asfáltica
Figura 7. Etapas da fabricação das misturas asfálticas em laboratório: (a) aquecimento do ligante
asfáltico, (b) pesagem dos agregados, (c) misturadora e (d) compactador
Figura 8. Resumo geral das misturas asfálticas dosadas
Figura 9. Composição granulométrica das misturas asfálticas dosadas
Figura 10. Relação entre teor de CAP e volume de vazios (VVs): (a) CA, (b) CPA, (c) SEMI e
(d) GAP
Figura 11. Esquema do ensaio de resistência à tração (RT) por compressão diametral53
Figura 12. Resultados de resistência à tração (RT) com variação no teor de CAP54
Figura 13. Resultados de resistência à tração (RT) das misturas asfálticas selecionadas55
Figura 14. Croqui do trecho experimental: (a) misturas de concreto asfáltico, (b) mistura de CPA
e (c) misturas descontínuas e gap-graded
Figura 15. Mapa de localização do trecho experimental na Autopista Régis Bittencourt 57
Figura 16. Fresagem do pavimento: (a) fresadora em operação, (b) material fresado colocado no
caminhão e (c) pista após a fresagem
Figura 17. Limpeza do pavimento: (a) limpeza com Bobcat e (b) limpeza com caminhão aspirador
Figura 18. Pintura de ligação: (a) caminhão aspergindo emulsão asfáltica e (b) pintura de ligação
finalizada
Figura 19. Usina da Neovia Engenharia: (a) tambor misturador, possível enxergar a chama para
aquecimento dos agregados e (b) tambor de armazenamento da cal, adicionada às misturas
asfálticas
Figura 20. Caminhão recebendo carga de mistura asfáltica na usina: (a) início do carregamento;
(b) caminhão com carga completa e (c) pesagem do caminhão60

Figura 21. Massa asfáltica na obra: (a) caminhão descarregando na vibroacabadora e (b)
vibroacabadora executando camada de revestimento
Figura 22. Retirada de amostras: (a) placa metálica com mistura; (b) amostras retiradas da placa
e (c) amostras retiradas da vibroacabadora
Figura 23. Compactação da mistura: (a) compactador de rolo liso; (b) compactador de rolo liso e
de pneus e (c) compactadores de pneus
Figura 24. Coleta de amostras: (a) massa asfáltica solta e (b) extração de corpos de prova 62
Figura 25. Distribuição granulométrica das misturas asfálticas aplicadas em campo: (a) concreto
asfáltico, (b) semi-descontínua (c) gap-graded
Figura 26. Sondagem do trecho experimental: (a) corte do pavimento e (b) pavimentado cortado
Figura 27. Espessuras e materiais da estrutura do pavimento antes da intervenção: (a) pavimento
real e (b) croqui da estrutura antiga
Figura 28. Categorias de veículos especificadas pela praça de pedágio (ANTT)70
Figura 29. Contagem de veículos comerciais
Figura 30. Treliça padronizada para levantamento de ATR em campo73
Figura 31. Valores médios de ATR por segmento
Figura 32. Valores de ATR em cada ponto de medição
Figura 33. Levantamento de área trincada no trecho experimental: (a) medição da área e (b)
exemplo de bloco de trincas interligadas
Figura 34. Evolução da porcentagem de área trincada por segmento
Figura 35. Levantamento de textura superficial em campo: (a) macrotextura e (b) microtextura
Figura 36. Resultados de macrotextura dos segmentos do trecho experimental
Figura 37. Resultados de microtextura dos segmentos do trecho experimental
Figura 38. Valores médios de IRI
Figura 39. Valores individuais de IRI: (a) TRI e (b) TRE
Figura 40. Levantamento deflectométrico por meio de FWD: (a) aplicação da carga e (b)
ilustração das deflexões na estrutura do pavimento (Fonte: Bernucci et al., 2007)
Figura 41. Deflexão máxima do trecho experimental: (a) eixo e (b) trilha de roda externa 86
Figura 42. Bacias deflectométricas médias do trecho experimental (TRE): (a) 0 meses, (b) 6
meses e (c) 12 meses
Figura 43. Bacias deflectométricas do trecho experimental (TRE) aos 12 meses: (a) CA, (b) CA+,
(c) CA-, (d) CPA, (e) SEMI, (f) SEMI+, (g) SEMI- e (h) GAP92

Página 12 de 285

Figura 44. Resultados de macrotextura dos segmentos do trecho experimental obtidos por meio
do perfilômetro (6 meses)
Figura 45. Resultados de microtextura dos segmentos do trecho experimental obtidos por meio
do grip tester (6 meses)
Figura 46. Sequência de preparação do ensaio no reômetro
Figura 47. Representação gráfica da aplicação de cargas no DSR: (a) esquema de aplicação da
tensão e (b) gráficos do pulso de tensão e de deformação (Fonte: Bernucci et al., 2007)
Figura 48. Determinação da zona viscoelástica linear do CAP: (a) amostra não-envelhecida, (b)
amostra envelhecida após o RTFOT, (c) amostra envelhecida após RTFOT+PAV a 16°C e (d) a
37°C após RTFOT+PAV
Figura 49. Parâmetro reológico  G* /send em diferentes temperaturas para o CAP não-
envelhecido100
Figura 50. Parâmetro reológico  G* /senδ em diferentes temperaturas para o CAP envelhecido
Figura 51. Parâmetro reológico  G* × senδ em diferentes temperaturas para o CAP envelhecido
em longo prazo 101
Figura 52. Curvas mestras do CAP: (a) módulo de cisalhamento dinâmico e (b) ângulo de fase
Figura 53. Resultados do ensaio de MSCR para o ligante asfáltico103
Figura 54. Resultados do ensaio de LAS em diferentes temperaturas: (a) evolução do ensaio e (b)
curva de fadiga
Figura 55. Aplicação de cargas no ensaio de MR: (a) duração dos tempos de carregamento e
repouso e (b) parcelas dos deslocamentos resilientes e permanentes durante o ensaio (Fonte:
Bernucci et al., 2007)
Figura 56. Ensaio de módulo de resiliência: (a) Aparato na MTS (b) Amostra posicionada 108
Figura 57. Módulo de resiliência instantâneo e total dos CPs extraídos de campo 108
Figura 58. Ensaio de módulo dinâmico: (a) representação da aplicação de tensão e resposta em
termos de deformação e (b) construção da curva mestra109
Figura 59. Ensaio de módulo complexo (a) amostra capeada com gesso (b) amostra posicionada
para ensaio110
Figura 60. Curvas mestras de módulo dinâmico das misturas asfálticas: (a) contínua (CA), (b)
semi-descontínua (SEMI) e (c) descontínua (GAP)111

Figura 61. Compactação de amostras em laboratório (a) método convencional com pneu liso; (b)
método com vibração, motovibrador em cima de placa metálica (c) motovibrador na etapa final,
diretamente na amostra113
Figura 62. Simulador de tráfego LCPC: (a) uma das amostras posicionada com pneu suspenso e
(b) medição de afundamentos
Figura 63. Resultados de afundamento de trilha de roda para a mistura contínua (CA): (a)
compactação vibrada e (b) compactação padrão115
Figura 64. Resultados de afundamento de trilha de roda para a mistura contínua (CA+): (a)
compactação vibrada e (b) compactação padrão116
Figura 65. Resultados de afundamento de trilha de roda para a mistura contínua (CA-): (a)
compactação vibrada e (b) compactação padrão117
Figura 66. Resultados de afundamento de trilha de roda para a mistura descontínua (GAP): (a)
compactação vibrada e (b) compactação padrão118
Figura 67. Resultados de afundamento de trilha de roda para a mistura semi-descontínua (SEMI):
(a) compactação vibrada e (b) compactação padrão119
Figura 68. Resultados de afundamento de trilha de roda para a mistura semi-descontínua
(SEMI+): (a) compactação vibrada e (b) compactação padrão120
Figura 69. Resultados de afundamento de trilha de roda para a mistura semi-descontínua (SEMI-
): (a) compactação vibrada e (b) compactação padrão 121
Figura 70. Equipamento servo-pneumático para ensaio de fadiga: (a) visão geral e (b) amostra
sendo ensaiada122
Figura 71. Ensaio de flexão de quatro pontos: (a) pulso de carga e (b) diagramas de esforço
cortante e momento fletor durante o ensaio
Figura 72. Resultados de resistência à fadiga para as diferentes misturas
Figura 73. Resultados de textura superficial em laboratório na condição inicial: (a) macrotextura
e (b) microtextura125
Figura 74. Evolução da textura superficial com ciclos de carregamento: (a) macrotextura e (b)
microtextura
Figura 75. Pavement Texture Analyzer (PTA): (a) visão frontal do equipamento, (b) equipamento
durante execução de ensaio e (c) visão interna durante execução de ensaio 129
Figura 76. Resultados da PTA: (a) curtose e (b) assimetria
Figura 77. Imagens de tomografia das misturas asfálticas: (a) CA+, (b) CA-, (c) CPA, (d) SEMI+,
(e) SEMI- e (f) GAP

Figura 78. Parâmetros da tomografia de amostra CA+: (a) histograma de poros e (b) perfil de
porosidade
Figura 79. Parâmetros da tomografia de amostra CA-: (a) histograma de poros e (b) perfil de
porosidade
Figura 80. Parâmetros da tomografia de amostra CPA: (a) histograma de poros e (b) perfil de
porosidade
Figura 81. Parâmetros da tomografia de amostra SEMI+: (a) histograma de poros e (b) perfil de
porosidade
Figura 82. Parâmetros da tomografia de amostra SEMI-: (a) histograma de poros e (b) perfil de
porosidade
Figura 83. Parâmetros da tomografia de amostra GAP: (a) histograma de poros e (b) perfil de
porosidade
Figura 84. Compactação de placa158
Figura 85. Pré-compactação com pneu159
Figura 86. Realização do ensaio de Pêndulo Britânico160
Figura 87. Realização do ensaio de Mancha de Areia161
Figura 88. Caixa para ensaio PTA com lâmpadas posicionadas162
Figura 89. Realização do ensaio PTA 162
Figura 90. Detalhe de uma das lâmpadas fixada à caixa com silicone163
Figura 91. Detalhe da tampa da caixa com o suporte para a câmera
Figura 92. Resultado de Assimetria para a placa 5 fornecido pela PTA. Note-se a diminuição da
dispersão das medidas após a fixação de lâmpadas e câmera164
Figura 93. Ensaio de verificação da zona viscoelástica linear em amostra não-envelhecida 183
Figura 94. Ensaio de verificação da zona viscoelástica linear em amostra envelhecida em RTFOT
Figura 95. Ensaio de verificação da zona viscoelástica linear em amostra envelhecida em PAV
Figura 96. Ensaio de curva mestra: temperaturas de 0 a 40°C (amostra 01) 188
Figura 97. Ensaio de curva mestra: temperaturas de 0 a 40°C (amostra 02) 188
Figura 98. Ensaio de curva mestra: temperaturas de 40 a 80°C (amostra 01) 189
Figura 99. Ensaio de curva mestra: temperaturas de 40 a 80°C (amostra 02) 189
Figura 100. Ensaio de curva mestra em amostra envelhecida no RTFOT: temperaturas de 0 a
40°C (amostra 01)

Figura 101. Ensaio de curva mestra em amostra envelhecida no RTFOT: temperaturas de 40 a
80°C (amostra 01)
Figura 102. Ensaio de curva mestra em amostra envelhecida no RTFOT: temperaturas de 40 a
80°C (amostra 02)
Figura 103. Ensaio de curva mestra em amostra envelhecida no PAV: temperaturas de 0 a 40°C
(amostra 01)
Figura 104. Ensaio de linear amplitude sweep (LAS): temperatura de 20°C (amostra 01) 201
Figura 105. Ensaio de linear amplitude sweep (LAS): temperatura de 20°C (amostra 01) 202
Figura 106. Ensaio de linear amplitude sweep (LAS): temperatura de 25°C (amostra 01) 203
Figura 107. Ensaio de linear amplitude sweep (LAS): temperatura de 25°C (amostra 02) 204
Figura 108. Ensaio de linear amplitude sweep (LAS): temperatura de 30°C (amostra 01) 205
Figura 109. Ensaio de linear amplitude sweep (LAS): temperatura de 30°C (amostra 02) 206
Figura 110. Ensaio de deformação permanente no simulador de tráfego: gap-graded (GAP) -
compactação vibrada (amostra 01)
Figura 111. Ensaio de deformação permanente no simulador de tráfego: gap-graded (GAP) -
compactação vibrada (amostra 02)
Figura 112. Ensaio de deformação permanente no simulador de tráfego: gap-graded (GAP) -
compactação padrão (amostra 01)
Figura 113. Ensaio de deformação permanente no simulador de tráfego: gap-graded (GAP) -
compactação padrão (amostra 02) 208
Figura 114. Ensaio de deformação permanente no simulador de tráfego: concreto asfáltico (CA)
– compactação vibrada (amostra 01)
Figura 115. Ensaio de deformação permanente no simulador de tráfego: concreto asfáltico (CA)
– compactação vibrada (amostra 02)
Figura 116. Ensaio de deformação permanente no simulador de tráfego: concreto asfáltico (CA)
- compactação padrão (amostra 01)210
Figura 117. Ensaio de deformação permanente no simulador de tráfego: concreto asfáltico (CA)
- compactação padrão (amostra 02)
Figura 118. Ensaio de deformação permanente no simulador de tráfego: semi-descontínua
(SEMI) – compactação vibrada (amostra 01)
Figura 119. Ensaio de deformação permanente no simulador de tráfego: semi-descontínua
(SEMI) – compactação vibrada (amostra 02)
Figura 120. Ensaio de deformação permanente no simulador de tráfego: semi-descontínua
(SEMI) – compactação padrão (amostra 01)

Figura 121. Ensaio de deformação permanente no simulador de tráfego: semi-descontínua
(SEMI) – compactação padrão (amostra 02)212
Figura 122. Ensaio de módulo complexo na mistura asfáltica CA (VV = 8,8%): (a) módulo
dinâmico e (b) ângulo de fase
Figura 123. Ensaio de módulo complexo na mistura asfáltica CA ( $VV = 7,6\%$ ): (a) módulo
dinâmico e (b) ângulo de fase
Figura 124. Ensaio de módulo complexo na mistura asfáltica CA ( $VV = 8,2\%$ ): (a) módulo
dinâmico e (b) ângulo de fase
Figura 125. Ensaio de módulo complexo na mistura asfáltica CA ( $VV = 4,5\%$ ): (a) módulo
dinâmico e (b) ângulo de fase
Figura 126. Ensaio de módulo complexo na mistura asfáltica CA ( $VV = 5,4\%$ ): (a) módulo
dinâmico e (b) ângulo de fase
Figura 127. Ensaio de módulo complexo na mistura asfáltica SEMI ( $VV = 8,4\%$ ): (a) módulo
dinâmico e (b) ângulo de fase
Figura 128. Ensaio de módulo complexo na mistura asfáltica SEMI (VV = 8,6%): (a) módulo
dinâmico e (b) ângulo de fase
Figura 129. Ensaio de módulo complexo na mistura asfáltica SEMI ( $VV = 7,3\%$ ): (a) módulo
dinâmico e (b) ângulo de fase
Figura 130. Ensaio de módulo complexo na mistura asfáltica SEMI ( $VV = 7,0\%$ ): (a) módulo
dinâmico e (b) ângulo de fase
Figura 131. Ensaio de módulo complexo na mistura asfáltica GAP ( $VV = 9,0\%$ ): (a) módulo
dinâmico e (b) ângulo de fase
Figura 132. Ensaio de módulo complexo na mistura asfáltica GAP (VV = 9,2%): (a) módulo
dinâmico e (b) ângulo de fase

### 1. DESCRIÇÃO DO PROJETO

#### 1.1. Título

# RESTAURAÇÕES DA CAMADA DE ROLAMENTO DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS VISANDO MAIOR DURABILIDADE E ATENDIMENTO DA TEXTURA SUPERFICIAL

#### 1.2. Resumo

As principais formas de deterioração de rodovias no Brasil são o trincamento por fadiga e a deformação permanente, defeitos que normalmente são observados nas camadas de revestimentos da estrutura de um pavimento asfáltico e que também pioram as condições de sua superfície. Uma das soluções que podem ser adotadas para diminuir o aparecimento precoce de trincas e fissuras em revestimentos asfálticos é a utilização de misturas asfálticas mais resistentes, com maior intertravamento entre seus agregados graúdos, e que historicamente têm gerado pavimentos asfálticos com vida útil mais satisfatória e menor necessidade de manutenção ao longo do tempo. No aspecto de segurança, a textura superficial também pode ser mais bem controlada pelos parâmetros da mistura asfáltica que compõe a camada de rolamento de um pavimento. É recomendado o uso de superfícies mais rugosas, que facilitem a aderência pneu/pavimento. Para garantir essa textura, são utilizadas misturas porosas, com granulometria aberta ao invés de densa, o que tem resultado em um maior volume de vazios, aumentando também a capacidade de drenagem da água. Este projeto de pesquisa tem como principal objetivo analisar soluções distintas de camadas de rolamento para a restauração de pavimentos asfálticos, avaliando como diferentes distribuições granulométricas e propriedades volumétricas influenciam na durabilidade dessas soluções e na textura superficial dos pavimentos.

#### 1.3. Palavras-chave

Pavimentos asfálticos; durabilidade; textura superficial.

#### 1.4. Justificativa

Dentre as principais formas de deterioração que são encontradas em pavimentos asfálticos, a fissuração e os afundamentos em trilha de roda são os defeitos mais recorrentes nas camadas de revestimento que compõem as rodovias brasileiras, principalmente os pavimentos sujeitos ao tráfego pesado de caminhões, muitos com excesso de carga, como o da Rodovia Régis Bittencourt e muitas das rodovias concessionadas brasileiras. A Rodovia Régis Bittencourt é um corredor de carga de Curitiba para São Paulo e vice-versa, sendo um dos mais importantes corredores da economia brasileira.

A durabilidade adequada dos pavimentos pode ser entendida como sua capacidade de não sofrer danos expressivos acumulados por longo período. No caso de rodovias concessionadas, este dano é limitado por indicadores empregados pelas agências para zelar pelos contratos de concessão, a fim de fornecer aos usuários pavimentos que ofereçam conforto ao rolamento adequado, além de segurança. Dentro do aspecto de segurança, os pavimentos podem colaborar positivamente para auxiliarem os condutores a não perderem a dirigibilidade, ou ainda a aderência, graças ao atrito pneu/pavimento.

A durabilidade das soluções de pavimentação asfáltica tem sido frequentemente baixa, decorrentes de problemas de dosagem das misturas, problemas de usinagem, erros executivos, e ainda de excesso de carga dos veículos comerciais.

Os dois mais importantes defeitos de revestimentos asfálticos são decorrentes da repetição de carga, causando o trincamento por fadiga dos revestimentos asfálticos e/ou os afundamentos por deformação permanente. O trincamento por fadiga e os afundamentos em trilha de roda dependem de diversos fatores, como o tráfego acumulado ao longo da vida útil do pavimento, as propriedades dos materiais utilizados, as espessuras das camadas, as condições climáticas e a manutenção periódica da via.

A ruptura de um revestimento asfáltico por fadiga resulta da repetição do carregamento do tráfego, e as trincas que aparecem tendem a se propagar a partir da camada asfáltica, o que acelera a deterioração estrutural do pavimento, causando infiltração de água e bombeamento de finos provenientes das camadas subjacentes (Priest e Timm, 2006). Há um consenso geral de que o trincamento por fadiga se inicia no fundo da camada de revestimento asfáltico devido à repetição de cargas, sendo associado às deformações por tração (Huang, 1993).

A previsão de desempenho de pavimentos asfálticos em termos de trincamento por fadiga tem sido o escopo de estudos realizados por diversos pesquisadores ao longo das últimas décadas. Ensaios laboratoriais têm sido desenvolvidos e aprimorados para melhor avaliar as condições de campo, no que diz respeito à aplicação de cargas, à frequência e à temperatura. Misturas asfálticas vêm sendo amplamente caracterizadas em laboratório em termos de resistência à fadiga, além do uso de outras escalas nas análises: ligante asfáltico e matriz de agregados finos (MAF) – esta última corresponde a uma fase intermediária entre ligante e mistura.

Alguns dos principais fatores que influenciam o trincamento por fadiga em misturas asfálticas, além do número de repetição de carga e de sua magnitude, são o volume de vazios (Zeiada et al., 2013), a granulometria dos agregados utilizados (Hafeez et al., 2014), o tipo de ligante asfáltico (Sugandh et al., 2007), a temperatura do local (Ongel e Harvey, 2004) e a espessura da camada projetada, bem como a rigidez do conjunto (sistema de camadas). Métodos de dimensionamento mecanicista-empíricos têm considerado muitos desses fatores, de forma a fornecer previsões mais realistas do desempenho do pavimento ao longo de sua vida útil. No entanto, algumas variáveis de campo muitas vezes não são levadas em consideração na etapa de projeto. Entre essas variáveis, inclui-se a variabilidade em relação à configuração dos vazios (distribuição dos vazios, dimensões dos vazios, entre outros aspectos) presentes na mistura asfáltica aplicada no pavimento.

O volume de vazios, o tamanho desses vazios, a interconectividade entre eles e a sua distribuição ao longo da camada de revestimento asfáltico são diretamente influenciados pela granulometria da mistura asfáltica, pela energia e pelo método de compactação de campo, que podem não ser totalmente eficazes e homogêneos ao longo do comprimento do trecho da rodovia a ser implantado. Sendo assim, faz-se necessária a avaliação e o entendimento da volumetria das misturas asfálticas no que diz respeito ao desempenho em termos de fissuração.

Uma das soluções que podem ser adotadas para diminuir o aparecimento precoce de trincas e fissuras em revestimentos asfálticos é a utilização de misturas asfálticas mais resistentes, com maior intertravamento entre seus agregados graúdos, e que historicamente têm gerado pavimentos asfálticos com vida útil mais satisfatória e menor necessidade de manutenção ao longo do tempo. Esse é o caso das misturas com granulometrias do tipo semi-descontínua e descontínua. Em comparação com o tipo de mistura mais utilizada nas rodovias brasileiras, o concreto asfáltico (CA), esses materiais têm uma maior proporção de agregados graúdos, o que pode resultar em uma maior quantidade de pontos de contato e uma menor segregação entre as partículas. Isso fornece um esqueleto mineral mais resistente e uma maior durabilidade à estrutura.

Em termos de deformação permanente, os revestimentos asfálticos sofrem as consequências da ação direta das cargas dos veículos, com a aplicação de tensões elevadas na superfície, o que pode levar ao surgimento de afundamento decorrente de parcela importante de deformação das misturas asfálticas que não se recuperam. No país, dada a temperatura ambiente elevada, e a solicitação por cargas de elevadas magnitudes, as deformações permanentes são um defeito comum nas rodovias de tráfego pesado.

Alguns outros parâmetros e características das misturas asfálticas podem ser determinantes em relação ao seu desempenho em termos de resistência à deformação permanente. A adoção de misturas asfálticas com uma maior proporção de agregados graúdos, fornecendo um maior número de pontos de contatos entre eles também é uma das soluções que vem sendo utilizadas, porém há outros aspectos a serem considerados. Misturas com granulometria do tipo descontinua, mesmo que produzidas com ligante asfáltico não modificado, resultam em baixo afundamento em trilha de roda (Moura, 2010). Ainda em relação à composição de agregados, existem alguns métodos de seleção de granulometria que têm sido utilizados para combater esse defeito em pavimentos asfálticos.

As propriedades de forma dos agregados também influenciam esse tipo de defeito. Espera-se que esses materiais tenham uma forma cúbica, uma elevada angularidade e uma textura superficial rugosa (Roberts et al., 1996). Uma comparação entre agregados arredondados e polidos (seixos rolados) e agregados angulares e rugosos (brita granítica) foi apresentada por Leandro (2016), que concluiu que o uso dos seixos, mesmo que britados, pode levar a resultados de afundamento em trilha de roda duas vezes maiores do que aqueles obtidos para as britas. Além dos agregados, o ligante asfáltico também contribui significativamente para o desempenho de misturas asfálticas em termos de deformação permanente. O tipo e o teor de ligante também podem melhorar o desempenho em termos desse defeito. Excesso de ligante asfáltico, que diminui o volume de vazios, tem levado a afundamentos precoces nos pavimentos.

No aspecto de segurança, a textura superficial também pode ser mais bem controlada pelos parâmetros da mistura asfáltica que compõe a camada de rolamento de um pavimento. É recomendado o uso de superfícies mais rugosas, que facilitem a aderência pneu/pavimento. Para garantir essa textura, são utilizadas misturas porosas, com granulometria aberta ao invés de densa, o que tem resultado em um maior volume de vazios, aumentando também a capacidade de drenagem da água (Vieira, 2014). O agregado e o ligante que compõem as misturas asfálticas também influenciam na textura superficial. Excesso de ligante e ligantes com baixa viscosidade causam exsudação, diminuindo a rugosidade dos pavimentos; agregados britados, com alta angularidade, também melhoram essa propriedade.

#### 1.5. Objetivos

Esta pesquisa tem como principal objetivo analisar soluções distintas de camadas de rolamento para a restauração de pavimentos asfálticos, avaliando como diferentes distribuições

granulométricas e propriedades volumétricas influenciam na durabilidade dessas soluções e na textura superficial dos pavimentos. As diferentes características das misturas asfálticas influenciam no desempenho mecânico dos revestimentos asfálticos em termos de fissuração, ou área trincada. Para o cumprimento do objetivo citado, as seguintes atividades são propostas:

- Seleção de quatro misturas asfálticas de graduação distinta, para comporem camada de rolamento nas restaurações de pavimentos asfálticos;
- Determinação em laboratório da composição granulométrica e da dosagem das misturas asfálticas no teor ótimo de ligante asfáltico (CAP);
- Seleção de local considerado homogêneo em termos deflectométricos e sem problemas estruturais, de maneira a buscar soluções aplicáveis às condições dos pavimentos e construção de um trecho experimental, composto por 8 (oito) segmentos distintos, variando-se: (i) a granulometria (contínua, semi-descontínua, descontínua e aberta), e (ii) o volume de vazios (para mistura continua e semi-descontínua), simulando diferentes condições de campo, dependente do teor de ligante empregado, sendo a) próximo aos 99% a 100% (ótimo), b) próximo aos 96% (falta), e c) próximo aos 101% (excessivo), perfazendo 3 segmentos de concreto asfáltico 3 diferentes volumes de vazios, 3 segmentos de mistura asfáltica semi-descontínua 3 diferentes volumes de vazios, além de uma descontínua e uma aberta, ambas no volume de vazios de projeto;
- Coleta e armazenamento do material usinado e empregado em pista para ser avaliado em laboratório;
- Determinação em laboratório de propriedades mecânicas das 4 diferentes granulometrias das soluções de misturas asfálticas, sendo duas delas com 3 diferentes teores de ligante, o que interfere no estado físico do material (volume de vazios em campo);
- Monitoramento do trecho experimental e análise das respostas estrutural, funcional e de aderência em campo.

#### 1.6. Organização do trabalho

O projeto de pesquisa foi desenvolvido em quatro grandes estudos: (i) construção e monitoramento de trecho experimental, (ii) caracterização laboratorial dos materiais utilizados, (iii) análise da durabilidade de cada uma das soluções tendo em vista a questão de estado dos revestimentos (volume e distribuição dos vazios), e (iv) análise dos resultados das misturas asfálticas quanto à textura superficial, avaliando o uso de diferentes graduações e a variação do

teor de ligante (e, consequentemente, no volume de vazio), bem como sua importância na aderência em pistas molhadas.

Inicialmente, foi realizado o projeto e a dosagem das diferentes misturas asfálticas aplicadas em campo: (i) a mistura densa e bem-graduada, (ii) a mistura semi-descontínua, (iii) a mistura descontínua, e (iv) a mistura aberta. As misturas tiveram sua distribuição de agregados adequada às faixas normatizadas para cada tipo de material, procurando adequar aos requisitos da concessionária e do PER. A dosagem, que consiste essencialmente na determinação do teor de projeto de ligante asfáltico, foi realizada de forma a atingir o volume de vazios (VV) comumente adotado em revestimentos asfálticos densos (4,0%, no caso das misturas avaliadas, com exceção da mistura aberta). Além disso, houve uma adaptação do procedimento, de forma a se obter o teor de CAP a ser utilizado para que fossem atingidos outros valores de VVs (cerca de 2,0 a 3,0% e cerca de 7,0%). Essa variação na volumetria das misturas asfálticas analisadas teve como objetivo avaliar como a mudança do teor na usinagem das misturas asfálticas afetaria o desempenho mecânico dos pavimentos asfálticos, ou seja, sua durabilidade (trincamento do revestimento asfáltico e ocorrência de afundamentos em trilha de roda), e qual a influência direta dessas propriedades nos aspectos funcionais dos pavimentos em relação à textura superficial (importante para a aderência pneu/pavimento em dias de chuva e consequentemente segurança do usuário da via).

Além do desempenho em termos de fissuração (ou área trincada) e dos afundamentos em trilha de roda, avaliados em campo, e da textura superficial, igualmente levantada em campo, foram avaliados outros defeitos que poderiam vir a ser encontrados em revestimentos asfálticos. Por se tratar de um material compósito, os materiais constituintes das misturas asfálticas também foram avaliados separadamente, por meio de ensaios reológicos no CAP, além da caracterização dos agregados.

Outro aspecto relevante que deve ser abordado, quando se trata das características volumétricas de uma mistura asfáltica, é a distribuição dos vazios ao longo do plano horizontal e do plano vertical desse tipo de material. É sabido que o tamanho e a interconectividade entre esses vazios, bem como sua distribuição ao longo da mistura asfáltica, podem se comportar de forma distinta para os mesmos valores de VVs, e isso tem influência direta no desempenho mecânico da mistura asfáltica. Testes utilizando o processamento digital de imagens (PDI) serão realizados para a mensuração dessa estrutura interna dos materiais aplicados em pista.

Esta pesquisa foi realizada por meio de algumas etapas que foram realizadas em sequência, ou simultaneamente, a depender do andamento do projeto:

- 1. Revisão bibliográfica;
- 2. Aquisição de equipamento de fadiga por flexão de quatro pontos;
- 3. Dosagem das misturas asfálticas e dimensionamento do trecho experimental;
- 4. Construção do trecho experimental e controle tecnológico;
- 5. Preparação de amostras e ensaios convencionais de laboratório;
- 6. Ensaios especiais de laboratório;
- 7. Monitoramento do trecho experimental;
- 8. Análise e tratamento dos dados do projeto;
- 9. Relatório;
- 10. Capacitação técnica de pessoal com transferência de tecnologia.

#### 1.7. Período de execução

O período de desenvolvimento do projeto foi de 01/11/17 a 31/08/19.

# 1.8. Cronograma de execução

ltem	Atividade	Mês 1	Mês 2	Mês 3	Mês 4	Mês 5	Mês 6	Mês 7	Mês 8	Mês 9	Mês 10	Mês 11	Mês 12
1	Revisão bibliográfica	х	х	Х	Х								
2	Aquisição de equipamento de fadiga por flexão em 4 pontos					х							
3	Dosagem das misturas asfálticas e dimensionamento do trecho experimental	х	х	х	х	x							
4	Construção do trecho experimental e controle tecnológico						x						
5	Preparação de amostras e ensaios convencionais de laboratório					х	x	х	х	х		х	x
6	Ensaios especiais de laboratório					x	x	x	х	x	x	x	x
7	Monitoramento do trecho experimental						х			х			Х
8	Análise e tratamento dos dados do projeto							x	Х	х			
9	Relatório				х						x		
10	Capacitação técnica de pessoal com transferência de tecnologia										x		

ltem	Atividade	Mês 13	Mês 14	Mês 15	Mês 16	Mês 17	Mês 18	Mês 19	Mês 20	Mês 21	Mês 22	Mês 23	Mês 24
1	Revisão bibliográfica												
2	Aquisição de equipamento de fadiga por flexão em 4												
	pontos												
3	Dosagem das misturas asfálticas e dimensionamento do												
	trecho experimental												
4	Construção do trecho experimental e controle												
-	tecnológico												
5	Preparação de amostras e ensaios convencionais de laboratório		х			х		х					
6	Ensaios especiais de laboratório	х	х			х	х	х	х	х	х		
7	Monitoramento do trecho experimental			х			x				х		
8	Análise e tratamento dos dados do projeto	Х	Х	х			x	Х	x	Х	Х		
9	Relatório				Х						X		
10	Capacitação técnica de pessoal com transferência de										x		
10	tecnologia										^		

#### 1.9. Local de execução

Esta pesquisa foi executada no Laboratório do Centro de Desenvolvimento Tecnológico (CDT) da ARTERIS, em conjunto com o Laboratório de Tecnologia de Pavimentação (LTP) da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (EPUSP). O trecho experimental foi construído na Autopista Régis Bittencourt (BR-116), entre os km 511 e 512 + 80m, sentido Sul.

#### 1.10. Equipe executora

A empresa que coordena os serviços é a ARTERIS, associada com o Laboratório de Tecnologia de Pavimentação (LTP) – Escola Politécnica da USP (EPUSP):

• Coordenação

Coordenador Geral: Luiz Marcelo de Souza Coordenador de Desenvolvimento em Pavimentos: Profa. Liedi Légi Bariani Bernucci

Equipe do CDT
 Guilherme Rodrigues
 Hugo Florêncio
 Alan Morais
 Fábio Frigo
 Manoel Charles

Assessoramento técnico do LTP
 Kamilla Vasconcelos
 Linda Lee Ho
 Edson Moura
 Iuri Bessa
 Marina Frederich de Oliveira
 Lucas Andrade
 Vanderlei Dias
 Guilherme Martins
 Rodrigo Vasconcelos

## 2. MÉTODOS E TÉCNICAS UTILIZADAS

As técnicas utilizadas em laboratório foram realizadas com base em ensaios normatizados por órgãos nacionais, como o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT), o Departamento de Estradas de Rodagem do Estado de São Paulo (DER-SP), da *American Association of State Highway and Transportation Officials* (AASHTO), da *American Society for Testing and* Materials (ASTM), entre outros. As técnicas de dosagem, a construção e o monitoramento do trecho experimental também foram realizados através de métodos estabelecidos na literatura, bem como com base em procedimentos normalmente adotados pela concessionária que administra a rodovia em estudo.

#### 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Os pavimentos asfálticos comumente utilizados no Brasil podem ser compostos por diferentes combinações de materiais em suas camadas, possuindo uma camada de revestimento constituída de mistura asfáltica. Essa mistura pode ser classificada de diversas formas, a depender da granulometria dos materiais utilizados, do método de produção e da forma de compactação.

De acordo com a granulometria de seus agregados, as misturas asfálticas a quente são divididas em densa, aberta e descontínua. As misturas densas são as mais utilizadas no Brasil e possuem um bom proporcionamento entre os tamanhos das partículas de agregado incorporadas, gerando um baixo volume de vazios. As misturas abertas possuem um índice elevado de vazios, devido à insuficiência de fíler para preenchê-los. Por fim, as misturas descontínuas possuem uma elevada quantidade de materiais graúdos, com poucas partículas de tamanho intermediário, tendo seus vazios completados por filer. Essa proporção resulta em um maior número de contato entre as partículas graúdas, melhorando, essencialmente, a resistência à deformação permanente (Bernucci et al., 2007).



Figura 1. Aspectos de misturas asfálticas com granulometria: (a) densa, (b) aberta e (c) descontínua (Fonte: Pavement Engineering)

Entre as principais motivações para o uso de misturas asfálticas descontínuas e semi-descontínuas, como o Stone Matrix Asphalt (SMA) e o gap-graded, respectivamente, em substituição ao uso de misturas densas, como o concreto asfáltico (CA), estão a obtenção de um material mais resistente à deformação permanente, com melhor aderência pneu/pavimento e com redução do ruído (Vasconcelos et al., 2011).

Roberts et al. (1996) descrevem o SMA como sendo uma mistura de agregado graúdo e agregado miúdo britados, filer mineral, cimento asfáltico de petróleo (CAP) e agente estabilizante, utilizado para prevenir o escorrimento do ligante, devido à descontinuidade da granulometria. No geral, a quantidade de agregado graúdo em um SMA fica entre 70 e 80%, enquanto a quantidade de filer é maior do que 10%, e o teor de ligante é elevado (acima de 6%).

Vasconcelos et al. (2011) fizeram uma comparação entre os parâmetros de dosagem (especialmente do teor ótimo de ligante asfáltico) entre três misturas densas, duas misturas descontínuas e uma mistura semi-descontínua, para diferentes tipos de ligante asfáltico. A **Tabela** 1 apresenta os teores de ligante obtidos para essas misturas, para o CAP convencional 30/45. É importante ressaltar que a sigla SPV corresponde às misturas densas, do tipo concreto asfáltico, com o valor do tamanho máximo nominal (TMN) indicado na sequência.

Tipo de mistura	Teor de ligante (%)
SPV 9,5mm	4,9
SPV 12,5mm	4,7
SPV 19mm	4,5
SMA 8S	6,9
SMA 11S	6,2
Gap-graded 12,5mm	5,6

Tabela 1. Teor de ligante para diferentes misturas (Vasconcelos et al., 2011)

Em termos de durabilidade da mistura asfáltica, vários estudos têm comparado diferentes granulometrias no que diz respeito ao seu comportamento aos principais defeitos que ocorrem revestimentos asfálticos, como trincamento por fadiga e deformação permanente. Moghaddam et al. (2011) compararam uma mistura asfáltica do tipo SMA com uma mistura do tipo CA por meio do ensaio de fadiga em vigota de quatro pontos. Os resultados obtidos pelos autores indicaram um melhor comportamento do SMA em relação ao número de ciclos até a ruptura. Dantas Neto et al. (2006) compararam uma mistura asfáltica descontínua com uma mistura contínua e obtiveram melhor resistência à fadiga e melhor resistência à deformação permanente para a primeira. Por outro lado, Neves Filho (2004) obteve valores similares de resistência à deformação permanente entre misturas do tipo CA e do tipo SMA. Em relação ao trincamento por fadiga, o SMA se comportou de maneira inferior.

#### 3.1. Influência dos agregados nas propriedades de misturas asfálticas

Além da granulometria, outros fatores relacionados com os agregados utilizados nas misturas asfálticas podem influenciar o desempenho dos pavimentos em relação aos seus principais defeitos. Entre eles, estão as características de forma, angularidade e textura superficial, e a composição mineralógica, que têm uma influência relevante especialmente na deformação permanente, porém também afetam o desempenho em relação ao trincamento por fadiga.

Sousa et al. (1998) concluíram que granulometrias mais miúdas tendem a elevar o teor de ligante asfáltico a ser incorporado na mistura, o que melhora a resistência à fadiga. Hafeez et al. (2015) encontraram resultados similares após obterem o comportamento à fadiga de uma mistura asfáltica por meio do ensaio de vigota em quatro pontos. Quatro diferentes granulometrias foram usadas nesse estudo, variando-se o TMN. O teor de ligante asfáltico para um volume de vazios de 4% variou de 6,2 a 6,9%. Os resultados indicaram uma menor resistência à fadiga para as misturas mais graúdas.

A textura superficial da camada de rolamento de um pavimento asfáltico é normalmente compreendida pelas propriedades de macrotextura e microtextura. A primeira depende primordialmente do raio das partículas de agregado e da posição dessas partículas na superfície da estrutura do pavimento, enquanto a segunda está ligada à rugosidade das partículas dos agregados em um nível microscópico (Kargah-Ostadi e Howard, 2015). De acordo com Dunford (2013), a macrotextura é influenciada pelo tamanho, pela forma e pelo arranjo das partículas de agregados graúdos, afetando a intensidade do ruído e a drenagem. A microtextura é uma medida que depende das características da superfície das partículas dos agregados graúdos ou do mástique formado entre o ligante asfáltico e os agregados miúdos, sendo então função da mineralogia dos agregados. Essa propriedade afeta a resistência à derrapagem, tanto em condições seca como molhada.

Em relação ao tamanho das partículas de agregados, três variáveis têm sido estudadas: (i) tamanho máximo nominal, (ii) faixa de tamanhos e (iii) granulometria (Benson, 1970). A granulometria dos agregados afeta a textura superficial no sentido em que misturas asfálticas densas, com valores baixos de vazios no agregado mineral, possuem uma textura superficial mais regular, ou polida, em comparação com misturas asfálticas de granulometria aberta (Sullivan, 2005). Rezaei et al. (2011) realizaram testes de resistência à derrapagem em misturas asfálticas com diferentes

granulometrias e concluíram que misturas abertas levam a melhores resultados em relação a misturas densas. Magnoni et al. (2016) verificaram que o aumento na quantidade de partículas miúdas aumenta a microtextura e diminui a macrotextura dos pavimentos asfálticos.

A forma das partículas do agregado que compõe um a mistura asfáltica também tem influência direta nas condições da superfície do pavimento. As características de forma estão relacionadas à fonte do material e ao processo de britagem ou de intemperismo, no caso de seixos ou areias (Benson, 1970). Shah e Abdullah (2010) utilizaram três agregados com classificações distintas em termos de forma (angular, alongado e achatado) e concluíram que misturas asfálticas produzidas com os agregados angulares levam a melhores resultados de resistência à derrapagem. Sengoz et al. (2014) obtiveram parâmetros de macrotextura em termos de mancha de areia e laser em placas asfálticas produzidas com diferentes agregados (basalto e calcário). Os tipos de agregados não influenciaram tanto na textura superficial das misturas asfálticas, porém o tipo de britagem foi relevante, uma vez que britadores por impacto geraram materiais mais cúbicos e mais angulares, resultando em uma textura mais elevada. Serdão et al. (2013) mediram o atrito de duas misturas asfálticas, sendo uma composta por seixo britado e outra composta por agregado natural do tipo gnaisse. As amostras das misturas foram desgastadas e, então, a micro e a macrotextura do material foram medidas após diferentes tempos de desgaste. Os autores obtiveram resultados similares para ambos os materiais testados.

A medição da textura superficial de pavimentos asfálticos pode ser realizada por diferentes tipos de equipamento. No Brasil, os testes mais comuns são realizados pelo ensaio de mancha de areia e ensaio de pêndulo britânico, para obtenção da macro e da microtextura, respectivamente. O ensaio de pêndulo britânico, realizado com base na ASTM E 303 (2013), consiste na perda de energia de um pêndulo com base constituída por uma borracha, ao deslizar sobre um pavimento. O resultado do ensaio está ligado com a resistência da superfície à derrapagem e é medido por meio do parâmetro British Pendulum Number (BPN). De acordo com o Manual de Restauração de Pavimentos Asfálticos do DNIT (2006), a microtextura de uma superfície de pavimento asfáltico pode ser classificada em diversas categorias, sendo recomendado um valor mínimo de BPN de 55. A Tabela 2 apresenta os limites das classes propostas.

Classificação	Limites de BPN
Perigosa	< 25
Muito lisa	25 - 31
Lisa	32 – 39
Insuficientemente rugosa	40-46
Medianamente rugosa	47 – 54
Rugosa	55 – 75
Muito rugosa	> 75

Tabela 2. Classificação de microtextura (DNIT, 2006)

O ensaio de mancha de areia (ASTM E 965, 2015) consiste em espalhar, em movimentos circulares, um volume conhecido de material apropriado, que pode ser areia limpa ou microesferas de vidro, sobre a superfície do pavimento. O procedimento é concluído quando os movimentos não são mais capazes de espalhar o material, que passam a preencher os vazios da superfície. Em seguida, o diâmetro do círculo formado é medido em quatro direções com o uso de uma trena, e então se obtém a média das medidas. O DNIT (2006) classifica a macrotextura de um pavimento asfáltico de acordo com o valor da altura de mancha de areia, que deve estar entre 0,6 e 1,2mm. A Tabela 3 apresenta a classificação proposta.

Classificação	Altura de mancha, HS (mm)
Muito fina ou muito fechada	< 0,2
Fina ou fechada	$0,\!2-0,\!4$
Média	0,4 - 0,8
Grosseira ou aberta	0,8 – 1,2
Muito grosseira ou aberta	> 1,2

Tabela 3. Classificação de macrotextura (DNIT, 2006)

Diversos pesquisadores têm estudado e proposto misturas asfálticas que possam resolver o problema do atendimento da textura superficial de pavimentos asfálticos. O uso de misturas asfálticas descontínuas tem sido proposto para melhorar os valores de altura de mancha de areia de BPN. Pereira et al. (2012) produziram misturas do tipo CA e SMA, de granulometrias densa e descontínua, respectivamente, e realizaram testes de micro e macrotextura. Os resultados obtidos

indicaram um valor de altura de mancha de 0,9mm para a mistura de SMA, enquanto a mistura de CA resultou em um valor de 0,5mm, abaixo do exigido pelo DNIT (> 0,6mm). Em relação à microtextura, a mistura de SMA teve um valor de BPN 15% superior em relação à mistura de CA, com ambas passando pelo critério do DNIT (> 55). Ramos (2015) obteve valores de BPN em torno de 0,85 para pavimentos construídos em Aracajú com revestimento asfáltico composto por SMA. Já Munhoz e Filla (2017) obtiveram valores de 0,65, ou seja, próximos ao limite mínimo do DNIT, para a altura da mancha de areia em pavimentos constituídos por revestimento em CA.

O empacotamento das partículas de agregado é uma variável muito relevante a ser considerada na etapa de dosagem de uma mistura asfáltica. Diversos autores têm proposto modelos de previsão de empacotamento para obter melhores resultados em relação a essa propriedade das misturas. Elkhalig et al. (2012) propuseram um método de melhorar o empacotamento dos agregados em uma mistura asfáltica, modificando a proporção de graúdo, miúdo e fíler em relação às granulometrias comumente utilizadas na Malásia. Desta forma, conseguiram melhor o arranjo das partículas, diminuindo a quantidade de vazios e consequentemente de ligante asfáltico. Com isso, conseguiram reduzir pela metade o afundamento em trilha de roda obtido pelo ensaio de simulador de tráfego de laboratório.

#### 3.2. Textura superficial de misturas asfálticas com diferentes granulometrias

Dada a importância da textura superficial do revestimento asfáltico na segurança à derrapagem (Aps, 2006), a avaliação da macrotextura e da microtextura se torna relevante para a área da engenharia rodoviária. Bernucci et al. (2008) afirmam que misturas do tipo gap-graded resultam em macrotextura superficial aberta ou rugosa, mesmo sem apresentar altos índices de vazios, devido à sua distribuição granulométrica.

Ongel et al. (2007) estudaram a macrotextura, a microtextura e a rugosidade de misturas asfálticas, relacionando-as com nível de ruído em alguns trechos construídos com revestimentos asfálticos de graduação densa, aberta e descontínua. A macrotextura e a rugosidade foram avaliadas com perfilômetro a laser e representadas pelo índice mean profile depth (MPD) e irregularidade longitudinal (international roughness index, IRI), respectivamente, conforme as normas ASTM E 1845 (2015) e ASTM E 1926 (2015), enquanto que a microtextura foi indicada pelos valores de resistência à derrapagem (VRD), obtidos em ensaios de pêndulo britânico, seguindo a ASTM E 303 (2018). Os resultados indicam, de um modo geral, maiores MPD e menores VRD para as misturas asfálticas do tipo gap-graded, em relação às misturas de concreto asfáltico. Em relação à

irregularidade, o IRI também apresentou tanto seu maior valor médio (1,2) quanto o menor (0,8) para misturas do tipo gap-graded, sendo o maior para uma mistura sem modificações, e o menor para uma mistura modificada por borracha. Os autores concluem que misturas modificadas por borracha apresentam maior atrito do que as não modificadas e, além disso, que o MPD está correlacionado ao índice de vazios e permeabilidade da mistura.

Moura (2010) obteve, através de ensaios de mancha de areia em trechos construídos com misturas asfálticas diferentes, macrotextura grossa ou aberta para misturas do tipo gap-graded e texturas médias para misturas do tipo concreto asfáltico. O autor observa ainda que não há uma relação entre a variação da textura e do afundamento de trilha de roda.

# 3.3. Diferenças no comportamento mecânico de misturas asfálticas do tipo gap-graded e concreto asfáltico

Um estudo feito pela COPPE/UFRJ, em parceria com a Nova Dutra em 2010, analisou amostras de diferentes granulometrias e tipos de misturas asfálticas, variando o teor de ligante em 0,25 e 0,50% para mais e para menos em relação ao teor de projeto da Nova Dutra. Essas misturas foram compactadas pelo Marshall, e seus teores de projeto foram comparados com os teores obtidos com o uso do compactador giratório (CCR, 2010). Para o caso do concreto asfáltico (CA), foram analisadas misturas com CAP 30/45, CAP 50/70, CAP modificado por SBS e ECOFLEX B, e para cada uma dessas, três tamanhos máximos nominais de agregados: 9,5, 12,5 e 19mm. Observou-se uma tendência de diminuição da vida de fadiga com a diminuição do teor de ligante de 0,5% para CAP 30/45 de 12,5mm. Por outro lado, um pequeno aumento do teor de ligante melhorou o comportamento das misturas em relação à fadiga. Esse aumento foi mais proeminente em misturas com asfaltos modificados por SBS, principalmente para a faixa de 12,5 mm, que apresentou aumento de 152% na vida de fadiga; e diminuiu para as demais faixas granulométricas, enquanto as misturas com ECOFLEX apresentaram maiores vidas de fadiga para a faixa de 9,5 mm, sobretudo para aquelas moldadas com compactador giratório (aumento de até 132%).

Para o gap-graded, o estudo avaliou misturas com dois asfaltos modificados, pelo polímero STYLINK tipo 60/85 e por uma borracha ECOFLEX PAVE B, todos na faixa 19mm CALTRANS. O teor de ligante de projeto da Nova Dutra foi 6,0% para o EXOFLEX PAVE B e 4,7% para STYLINK 60/85, enquanto que os ensaios na COPPE foram 5,65% e 4,90%, respectivamente. As misturas com STYLINK apresentaram vida de fadiga em torno de 44% maior

para a mistura moldada no compactador giratório da COPPE, enquanto que as modificadas com ECOFLEX indicaram maior vida de fadiga para os corpos de prova moldados com compactador Marshall. No entanto, os teores de vazios determinados nestes corpos de prova com ECOFLEX moldados no Marshall estavam abaixo do teor correto (5%).

Liu et al. (2012) analisaram misturas do tipo stone matrix asphalt (SMA) e gap graded, ambas de graduação descontínua. O gap-graded apresentou melhor resistência ao trincamento por fadiga em todos os níveis de tensão adotados no ensaio, além de menor sensibilidade à variação de tensão. Os autores especulam que o melhor desempenho do gap-graded se deve a dois fatores: à borracha contida na mistura, que melhora a adesão entre o asfalto e a superfície do agregado, além de ser flexível mesmo a temperaturas baixas; e ao maior teor de asfalto, que, para um mesmo esqueleto de agregado, resulta em camada mais espessas de asfalto na superfície dos agregados, aumentando a relaxação e a recuperação do asfalto.

Mello et al. (2018), através da teoria do dano aplicada a pavimentos submetidos a uma série de testes, buscaram representar matematicamente a fadiga em misturas asfálticas, propondo parâmetros para relacionar aspectos da mistura à resposta à fadiga. Os autores deduzem que o gapgraded acumula menos dano do que o concreto asfáltico, para uma mesma rigidez, o que se reflete em uma maior resistência ao trincamento por fadiga.

Usualmente, menores teores de ligante contribuem para menores deformações permanentes. Moura (2010) constatou que em misturas de concreto asfáltico o tipo de ligante exerce grande influência na deformação em trilha de roda, sendo aqueles com baixas consistências (como CAP 50/70) mais sensíveis à variação do teor de ligante, enquanto que as misturas com ligantes modificados por polímeros, como SBS e RET, apresentaram melhor desempenho e menor sensibilidade à variação, inclusive quando aumentado o teor de ligante. Através de levantamentos de campo, Moura observou afundamentos ligeiramente superiores para asfaltos com CAP 30/45 do que asfaltos modificados, mas com melhor resistência à deformação permanente do que o CAP 50/70. Outro fator influente na resistência à deformação permanente avaliada pelo mesmo autor foi a distribuição granulométrica. Misturas do tipo gap-graded apresentaram melhor desempenho em relação às misturas de concreto asfáltico com respeito à deformação em trilha de roda, independentemente do tipo de ligante. Embora, devido ao maior ou menor contato proporcionado entre os agregados graúdos, o ligante também interfere no comportamento das misturas (Bernucci et al., 2008).
Bastos et al. (2015) comparam misturas de concreto asfáltico de trechos de rodovias construídas no Ceará (BR-222) e em São Paulo (BR-116) quanto à deformação permanente, utilizando o flow number (FN), definido por Witczak et al. (2002) como o número de ciclos em que a taxa de deformação plástica é mínima e a partir do qual o CP rompe. A mistura cearense foi dosada pelo método Marshall, com teor de CAP 50/70 igual a 5,8%, e a paulista pelo Superpave, utilizando 4,7% de CAP 30/45. Em campo, o trecho construído no Ceará teve flechas medidas com treliças metálicas com base de 1,2m (DNIT-PRO 006/03), já o trecho de São Paulo foi analisado com o Sistema de Visualização do Pavimento em 3D (SCAN VIAS 3D), utilizando sensores a laser e imagens da superfície. Em laboratório, as misturas foram avaliadas através de ensaio uniaxial de carga repetida. A mistura asfáltica do trecho cearense apresentou flecha máxima de 12,5mm (adotado como critério máximo de deformação permanente em experimentos e pesquisas nacionais e internacionais) em certos locais já nos primeiros sete meses de tráfego liberado, o que, juntamente com o FN de valor igual a 46 em laboratório, endossa a fragilidade do material. Já a mistura paulista, indicou afundamento de trilha de roda inexpressivo mesmo após 3,5 anos da sua construção e apresentou FN no valor de 1.217, mesmo considerando tráfego pesado. Os autores apontam a distribuição granulométrica com maior porcentagem de miúdos e o maior teor de CAP, devido à metodologia Marshall, como alguns dos responsáveis pelo desempenho insatisfatório da mistura do trecho cearense.

# 4. ENSAIOS CONVENCIONAIS DE LABORATÓRIO

A primeira etapa da pesquisa, que envolveu testes de laboratório, foi a realização de ensaios considerados <u>convencionais</u>, ou seja, ensaios que são normalmente feitos em diversos projeto de mistura asfáltica com objetivo de sua validação para aplicação em pista. Esses ensaios são divididos entre os dois principais materiais que constituem as misturas asfálticas estudadas nesta pesquisa (agregados e ligante asfáltico), bem como as próprias misturas asfálticas produzidas.

## 4.1. Caracterização dos agregados

Os agregados minerais utilizados na pesquisa são provenientes da Pedreira Basalto 8, localizada no município de Quatro Barras (PR). Três tamanhos de agregados foram coletados para caracterização e utilização na composição das misturas asfálticas (**Figura 2**). A caracterização dos agregados por meio de ensaios convencionais foi realizada de acordo com as padrões normatizados, para obtenção das seguintes propriedades:

- Análise granulométrica de agregados finos e graúdos (ARTERIS T 27);
- Massa específica e absorção de agregados finos (ARTERIS T 84);
- Massa específica e absorção de agregados graúdos (ARTERIS T 85);
- Partículas chatas, alongadas ou chatas e alongadas no agregado graúdo (ARTERIS D 4791);
- Solo ou agregado miúdo determinação de equivalente de areia (ABNT/NBR 12052);
- Determinação da resistência à abrasão Los Angeles (ABNT/NBR 6465).



Figura 2. Pilhas de agregados na pedreira: (a) brita 3/4", (b) pedrisco e (c) pó de pedra

O ensaio de análise granulométrica de agregados miúdos e graúdos consiste em determinar a distribuição os tamanhos das partículas desses materiais por meio de peneiramento. Foram utilizadas peneiras de malha quadrada de tamanhos diversos, seguindo uma série padronizada. A

quantidade da amostra de agregados foi de 10kg para a <u>brita 3/4"</u>, 1kg para o <u>pedrisco</u> e 300g para o <u>pó de pedra</u> e para a <u>cal hidratada (CH-I)</u>. Os resultados obtidos são mostrados na **Tabela 4** e na **Figura 3**. Os resultados da caracterização física dos agregados encontram-se na **Tabela 5**.

Abertura da peneira		Porcentagem passante (%)					
Malha	Tamanho (mm)	Brita 3/4"	Pedrisco	Pó de pedra	Cal CH-I		
1"	25,0	100,0	100,0	100,0	100,0		
3/4"	19,0	98,8	100,0	100,0	100,0		
1/2"	12,5	40,6	100,0	100,0	100,0		
3/8"	9,5	9,6	95,6	100,0	100,0		
No. 4	4,8	0,4	8,5	98,6	100,0		
No. 10	2,0	0,3	0,4	73,3	100,0		
No. 40	0,42	0,3	0,3	36,2	94,0		
No. 80	0,18	0,3	0,3	23,0	88,0		
No. 200	0,075	0,3	0,3	14,4	84,0		

Tabela 4. Resultados da análise granulométrica dos agregados



Figura 3. Granulometrias dos agregados coletados na pedreira

Ensaio			I imitaa			
Ensaio		Brita 3/4" Pedrisco Pó de		Pó de pedra	Limites	
Equivalente de a	reia (%)	_	—	68	≥ 60	
Abrasão Los Angeles (%)		16		_	≤ 45	
Porcentagem de	3:1	8		_	$\leq 20$	
partículas (%)	5:1	1		_	≤ 5	
Massa específica	Real	2,699	2,693	2,962	_	
$(g/cm^3)$	Aparente	2,661 2,634		2,649	_	
Absorção (%)		0,5	0,8	0,6	_	

Tabela 5. Caracterização dos agregados

Os ensaios para obtenção da massa específica dos agregados requereram uma amostra de no mínimo 2kg e 1kg para os graúdos e miúdos, respectivamente. Para o material graúdo, foram obtidos os valores de <u>massa específica real</u> e <u>massa específica aparente</u>, que medem, respectivamente, a razão entre a massa de um agregado e o seu volume desconsiderando todos os poros do material e a razão entre a massa de um agregado e o seu volume considerando os poros da partícula (**Figura 4**).



Figura 4. Esquema da massa específica de agregados: (a) real e (b) aparente

O ensaio para verificação de partículas chatas, alongadas ou chatas e alongadas do agregado graúdo tem como objetivo determinar a porcentagem de material lamelar dentro da amostra do material testado. Esse ensaio está diretamente ligado à forma das partículas do agregado, uma vez que é desejável a presença de materiais cúbicos para a composição de uma mistura asfáltica. O ensaio consistiu na medição das partículas do agregado, uma a uma, em relação às suas dimensões

(espessura, largura e comprimento) por meio do uso de um paquímetro especial que contém um braço móvel com relações que variam de 2:1 até 5:1 (Figura 5).



Figura 5. Paquímetro especial para medição de lamelaridade (ARTERIS D 4791): (a) consideração do comprimento e (b) consideração da espessura

O parâmetro de equivalente de areia é determinado para verificar se há uma presença elevada de materiais finos plásticos ou argilosos em um conjunto de agregados miúdos. O ensaio mede a relação entre a altura das partículas granulares sedimentadas no fundo de uma proveta e a altura das partículas argilosas suspensas em uma solução de cloreto de cálcio.

O ensaio de resistência à abrasão Los Angeles consistiu na colocação de uma amostra de agregado graúdo junto de esferas de ferro dentro de um tambor, que gira em uma velocidade média de 30 a 33rpm. As esferas, cada uma com massa de aproximadamente 440g, realizam um processo de quebra dos agregados dentro do tambor. No final do ensaio, é determinada a porcentagem em massa perdida ou degradada, através da diferença entre as massas final e inicial da amostra. A massa final considerada é aquela retida na peneira de 1,7mm.

O ligante asfáltico incorporado às misturas asfálticas estudadas nesta pesquisa foi do tipo <u>FLEXPAVE 60/85-E</u>, que é um CAP modificado por polímero elastômero (SBS). A **Tabela 6** apresenta os principais índices físicos desse material, cujas especificações (valores limites) são provenientes da Resolução 32/2010 da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) e da especificação DNIT 129 (2011).

Ensaio		Norma	Resultado	Limite
Penetração a 25°C	(0,1mm)	NBR 6576	47.0	40 - 70
Ponto de amolecimo	ento (°C)	NBR 6560	64,5	≥ 60
Ponto de fulgor (°C)		NBR 11341	> 240	≥235
Densidade relativa a 25°C (g/cm <sup>3</sup> )		NBR 6296	1,01	_
Recuperação elástica a 25°C (%)		NBR 15085	87,0	≥ 85
	a 135°C		1745,0	≤ 3.000
Viscosidade Brookfield (cP)	a 150°C	NBR 15184	771,0	$\leq$ 2.000
	a 177°C	- -	240,5	≤ 1.000

Tabela 6. Caracterização do ligante asfáltico (FLEXPAVE 60/85-E)

Em relação à viscosidade do CAP e sua relação com as temperaturas de usinagem e de compactação (TUC) das misturas asfálticas, a **Figura 6** apresenta os resultados obtidos pelo ensaio realizado no viscosímetro Brookfield para as temperaturas testadas de acordo com a norma.



Figura 6. Temperaturas de usinagem e compactação da mistura asfáltica

A partir do gráfico obtido, verifica-se que CAP utilizado deveria ser usinado e moldado em temperaturas muito elevadas, porém, o que é um resultado comum para ligantes asfálticos modificados. Devido a isso, o fabricante do CAP recomenda que a usinagem seja executada na temperatura máxima de 165°C.

#### 4.2. Dosagem das misturas asfálticas

A etapa de dosagem dentro de um projeto de pavimento rodoviário tem como principal objetivo determinar a proporção dos materiais que compõem uma mistura asfáltica para que ela tenha um bom desempenho ao longo da vida útil de uma estrutura de pavimento. A dosagem determina o teor de projeto (muitas vezes chamado de teor "ótimo") a ser incorporado às misturas asfálticas, e que deve atender a requisitos de agências reguladoras e depende de algumas características das misturas produzidas, principalmente de parâmetros volumétricos que são medidos durante esse processo.

Existem diversas metodologias de dosagem que se diferenciam a depender das premissas que são levadas em consideração, do tipo de compactação e dos parâmetros que são calculados para validar um projeto de uma mistura asfáltica. Essas metodologias muitas vezes são combinadas de forma a produzir as misturas asfálticas requeridas pelo projeto.

A metodologia de dosagem Marshall consiste na seleção de agregados e de ligante asfáltico disponíveis para o projeto, sem requisitos claros sobre sua qualidade e comportamento, além da compactação de amostras de misturas asfálticas por impacto e obtenção de propriedades volumétricas que atendam a requisitos previamente estabelecidos. Por fim, exige a verificação de dois parâmetros mecânicos, estabilidade e fluência, que são considerados ultrapassados atualmente. Já a metodologia Superpave, desenvolvida com o objetivo de gerar misturas asfálticas mais duráveis, necessita de uma melhor seleção do ligante asfáltico, dos agregados e da sua distribuição granulométrica, além de trazer premissas que correlacionam a compactação de laboratório com a compactação de campo, fazendo correspondências entre o número de giros durante a compactação, feita por amassamento, e a densidade que se deseja obter em campo para cada mistura asfáltica projetada. Os principais parâmetros volumétricos medidos durante os processos de dosagem comumente adotados no Brasil (Marshall e Superpave) são calculados conforme **Equação 1, Equação 2, Equação 3 e Equação 4**.

$$Gmb = \frac{Ms}{Msss - Msub} \times \rho_a$$
(1)

Onde: Gmb é a massa específica da amostra compactada (g/cm<sup>3</sup>);

Ms é a massa seca da amostra compactada (g);

Msss é a massa da amostra compactada em condição de superfície saturada seca (g);

Msub é a massa da amostra compactada submersa em água (g);

 $\rho_a$  é a massa específica da água na temperatura de pesagem (g/cm<sup>3</sup>).

$$VV = 100 \times \frac{DMT \times Gmb}{DMT}$$
(2)

Onde: VV é o volume de vazios da amostra (%);

DMT é a densidade máxima teórica (g/cm<sup>3</sup>);

Gmb é a massa específica aparente da amostra compactada (g/cm<sup>3</sup>).

$$VAM = 100 - \left(\frac{Gmb \times \sum \%n}{Gsb}\right)$$
(3)

Onde: VAM é o volume de vazios do agregado mineral (%);

Gmb é a massa específica aparente da amostra compactada (g/cm<sup>3</sup>);

 $\Sigma$ %n é a porcentagem de agregados, em massa, na mistura asfáltica (%);

Gsb é a massa específica aparente da mistura de agregados (g/cm<sup>3</sup>).

$$RBV = 100 \times \left(\frac{VAM - VV}{VAM}\right)$$
(4)

Onde: RBV é a relação betume/vazios (%);

VV é o volume de vazios da amostra compactada (%);

VAM é o volume de vazios do agregado mineral (%).

O ensaio para obtenção dos parâmetros de *estabilidade* e *fluência* tem sido substituído por outros ensaios mecânicos, especialmente na última década. Esse ensaio consiste na aplicação de uma carga a velocidade constante de 0,8mm/s em uma amostra de mistura asfáltica. A estabilidade, medida em N ou kgf, é a carga máxima a qual o corpo-de-prova testado resiste antes da ruptura e a fluência é o deslocamento vertical corresponde a essa carga máxima (medida em mm). A norma brasileira DNIT 031 (2006) especifica as faixas de valores para os parâmetros de dosagem apresentados, para misturas asfálticas densas do tipo concreto asfáltico (**Tabela 7** e **Tabela 8**). Tem-se adotado ainda valores mínimos para o parâmetro de resistência à tração (RT) por compressão diametral.

Tabela 7. Especificações para parâmetros de dosagem de concreto asfáltico (DNIT 031, 2006)

	Tipo da camada			
Parâmetro	Camada de rolamento	Camada de ligação		
Volume de vazios, VV (%)	3 – 5	4-6		
Relação betume/vazios, RBV (%)	75 - 82	65 – 72		
Estabilidade (kgf)	$\geq 5$	00		
Resistência à tração a 25°C, RT (MPa)	$\geq 0$	,65		

**Tabela 8.** Especificações para valores de VAM na dosagem de concreto asfáltico (DNIT 031,<br/>2006)

Tamanho máximo nominal dos agregados (mm)	Valor mínimo (%)
38,1	13
25,4	14
19,1	15
12,7	16
9,5	18

O processo de dosagem das misturas asfálticas aplicadas na construção do trecho experimental e estudadas em laboratório (**Figura 7**) foi realizado com o uso de materiais provenientes da Pedreira Basalto 8, localizada no município de Quatro Barras, no estado do Paraná, previamente apresentados neste relatório. Essa dosagem levou em consideração algumas das premissas da metodologia Superpave, principalmente no que diz respeito à distribuição granulométrica da mistura de agregados, e do método de compactação, que foi realizada por meio de um Compactador Giratório Superpave (CGS).



Figura 7. Etapas da fabricação das misturas asfálticas em laboratório: (a) aquecimento do ligante asfáltico, (b) pesagem dos agregados, (c) misturadora e (d) compactador

Para a presente pesquisa, as misturas asfálticas propostas foram divididas em quatro tipos, a depender do tipo de granulometria: (i) mistura densa e contínua do tipo concreto asfáltico (CA); (ii) mistura aberta do tipo camada porosa de atrito (CPA); (iii) mistura densa e semi-descontínua (SEMI); (iv) e mistura densa e descontínua do tipo gap-graded (GAP). As misturas do tipo CA e SEMI foram dosadas de forma a se obter não apenas o teor de projeto para 4,0% de volume de vazios (VV), que é normalmente considerado para esses tipos de misturas asfálticas, mas também teores correspondentes a um valor de VV acima e a um valor de VV abaixo, conforme proposto inicialmente para esta pesquisa (Figura 8). Esses valores de VV se correlacionam com o nível de compactação das misturas asfálticas produzidas de forma a ter densidades, tanto em campo como em laboratório, próximas aos limites mínimos e máximos adotados no Brasil para misturas asfálticas densas e contínuas (de 97 a 101%, de acordo com a norma de especificações DNIT 031, 2006). Para essas misturas asfálticas (CA e SEMI), a granulometria, a ser apresentada posteriormente, e a energia de compactação foram mantidas as mesmas, havendo variação apenas no teor de CAP. Já as misturas de CPA e GAP foram dosadas com o objetivo de se determinar apenas o teor de ligante necessário para atingir a faixa de VV padrão para esses tipos de misturas asfálticas (18 a 25% para o CPA e 4 a 6% para o GAP).



Figura 8. Resumo geral das misturas asfálticas dosadas

A distribuição granulométrica das misturas asfálticas foi composta de forma a atender os critérios das especificações Superpave e das normas internas da concessionária (ARTERIS ET 323, 2004). Para isso, os agregados foram combinados de acordo com as proporções apresentadas na **Tabela 9**. Para a composição dos agregados, foram consideradas as faixas granulométricas recomendadas pelas normas da concessionária, conforme apresentado na **Tabela 10**. É importante ressaltar que as faixas recomendadas para as misturas CA e SEMI são as mesmas, ou seja, ambas as misturas poderiam ser consideradas como tendo o mesmo tipo de granulometria (densa e contínua), porém há uma diferença entre a distribuição granulométrica de cada uma delas, que será apresentada posteriormente, fazendo com elas sejam consideradas distintas do ponto de vista do empacotamento de suas partículas de agregados. A **Figura 9** apresenta a curva de distribuição dos tamanhos de agregados das misturas asfálticas dosadas e as faixas granulométricas especificadas para cada tipo de material.

	8 8 8	1	,				
Tipo da	Porcentagem na composição (%)						
mistura asfáltica	Brita 3/4	Pedrisco	Pó de pedra	Cal CH-I			
CA	12,0	47,0	39,5	1,5			
SEMI	8,0	58,0	32,5	1,5			
СРА	0,0	83,0	15,5	1,5			
GAP	12,0	60,0	26,5	1,5			

Tabela 9. Porcentagem de agregados para composição das misturas asfálticas

Abertura da peneira		Porcentagem passante (%)								
		СА		SE	SEMI		СРА		GAP	
Faixa a	adotada	SPV 12,5		SPV	SPV 12,5		XII	Faixa 8		
Malha	Tamanh o (mm)	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	
1"	25,0	100	100	100	100	100	100	100	100	
3/4"	19,0	100	100	100	100	100	100	100	100	
1/2"	12,5	90	100	90	100	100	100	90	100	
3/8"	9,5	58	90	58	90	70	100	78	92	
No. 4	4,8	38	55	38	55	20	40	28	42	
No. 10	2,0	26	36	26	36	5	20	14	24	
No. 40	0,42	11	21	11	21	3	12	8	18	
No. 80	0,18	5	15	5	15	2	8	5	12	
No. 200	0,075	2	10	2	10	0	4	2	7	

Tabela 10. Especificações de granulometria para as misturas asfálticas







Figura 9. Composição granulométrica das misturas asfálticas dosadas

Diferentes teores de ligante asfáltico foram inicialmente adotados com o objetivo de se obter uma curva (Figura 10) da relação entre teor de CAP × volume de vazios (VV). Essa relação serviu de apoio para que fossem determinados os teores de projeto de cada mistura asfáltica proposta na pesquisa, com base nos valores de VV requeridos. A partir dos resultados obtidos, foram selecionados os teores de CAP a serem considerados na produção das misturas asfálticas de campo. Os parâmetros de dosagem das misturas finais são mostrados na Tabela 11, na Tabela 12, na Tabela 13 e na Tabela 14.



Figura 10. Relação entre teor de CAP e volume de vazios (VVs): (a) CA, (b) CPA, (c) SEMI e (d) GAP

Davâmatra	Misturas asfálticas				
Farametro	СА	CA+	CA-		
Teor de projeto de ligante asfáltico (%)	4,7	4,0	5,2		
Densidade aparente da mistura compactada, Gmb	2,387	2,340	2,397		
Densidade máxima medida, Gmm	2,486	2,511	2,466		
Volume de vazios, VV (%)	4,0	6,8	2,8		
Vazios do agregado mineral, VAM (%)	14,0	15,0	14,0		
Vazios com betume, VCB (%)	71,1	54,4	79,9		

Tabela 11. Parâmetros de dosagem das misturas asfálticas contínuas

Davâmatra	Misturas asfálticas			
r ar ametro	SEMI	SEMI+	SEMI-	
Teor de projeto de ligante asfáltico (%)	5,0	4,3	5,5	
Densidade aparente da mistura compactada, Gmb	2,377	2,342	2,386	
Densidade máxima medida, Gmm	2,476	2,505	2,460	
Volume de vazios, VV (%)	4,0	6,5	3,0	
Vazios do agregado mineral, VAM (%)	14,4	15,0	14,5	
Vazios com betume, VCB (%)	72,2	56,6	79,3	

Tabela 12. Parâmetros de dosagem das misturas asfálticas semi-descontínuas

Tabela 13. Parâmetros de dosagem da mistura asfáltica aberta

Danâmatua	Mistura asfáltica
rarametro	СРА
Teor de projeto de ligante asfáltico (%)	4,4
Densidade aparente da mistura compactada, Gmb	2,027
Densidade máxima medida, Gmm	2,502
Volume de vazios, VV (%)	19,0
Vazios do agregado mineral, VAM (%)	26,4
Vazios com betume, VCB (%)	28,1

Tabela 14. Parâmetros de dosagem da mistura asfáltica descontínua

Davâmatra	Mistura asfáltica
rarametro	GAP
Teor de projeto de ligante asfáltico (%)	5,5
Densidade aparente da mistura compactada, Gmb	2,325
Densidade máxima medida, Gmm	2,463
Volume de vazios, VV (%)	5,6
Vazios do agregado mineral, VAM (%)	16,7
Vazios com betume, VCB (%)	66,5

#### 4.3. Resistência à tração por compressão diametral (RT)

A resistência à tração por compressão diametral (RT) de misturas asfálticas é uma propriedade de interesse para a engenharia rodoviária, uma vez que pode ser um indicativo da resistência da camada de revestimento ao trincamento. Essa propriedade está diretamente associada ao teor de ligante asfáltico e às características de empacotamento dos agregados, bem como dos vazios das misturas testadas. O ensaio de RT é normalmente feito através da aplicação de tração indireta por compressão diametral, configuração que foi idealizada no Brasil com o objetivo inicial de determinar a resistência de amostras de concreto de cimento Portland. O procedimento de ensaio consta na norma DNIT 136 (2010) e consiste na aplicação de uma carga estática de compressão ao longo de um corpo-de-prova (**Figura 11**), com o objetivo de submetê-lo a tensões de tração que são desenvolvidas no diâmetro horizontal ou perpendicular ao eixo de aplicação da carga. O valor de RT é obtido através da **Equação 5** e é normalmente especificado em projetos de dosagem para validação de misturas asfálticas a serem aplicadas em campo.



Figura 11. Esquema do ensaio de resistência à tração (RT) por compressão diametral

$$RT = \frac{2P}{100 \times \pi \times D \times h}$$
(5)

Onde: RT é o valor de resistência à tração (MPa);

P é o valor da carga na ruptura (N);

D é o diâmetro da amostra (cm);

h é a altura da amostra (cm).

O ensaio de RT foi realizado a 25°C nas amostras de misturas asfálticas produzidas com os diferentes teores de CAP. O resultado desse ensaio tem sido usado para validar misturas asfálticas na etapa de dosagem e para verificar como a variação no teor de CAP e no VV pode influenciar essa propriedade do material. A **Figura 12** apresenta os resultados obtidos.



Figura 12. Resultados de resistência à tração (RT) com variação no teor de CAP

Todas as misturas asfálticas produzidas durante a dosagem tiveram valores de RT acima do mínimo normalmente recomendado (0,65MPa) para misturas do tipo concreto asfáltico pela norma DNIT 031 (2006), com a mistura de CPA tendo valores baixos para todos os teores de ligante asfáltico, o que era esperado, considerando as características desse material. Isso pode ser explicado pelo elevado volume de vazios em mistura abertas (18 a 25%), o que torna o material mais frágil. Normalmente, esse tipo de mistura asfáltica, quando utilizada como camada de revestimento de pavimentos, não tem função estrutural, sendo construída sobre uma camada de concreto asfáltico ou outro tipo de mistura mais resistente ao tráfego. A variação no teor de CAP indicou que há uma tendência de aumento no valor de RT com o aumento na quantidade de ligante asfáltico até determinado teor, depois o valor de RT começa a diminuir. Isso aconteceu para os quatro tipos de misturas asfálticas dosadas.

Após a seleção do teor de CAP, realizada com base nos valores de VV escolhidos para a continuidade da pesquisa, foram feitas réplicas das misturas asfálticas nesses teores, e então o ensaio de RT foi realizado novamente (**Figura 13**). É possível verificar que os maiores valores de RT para as misturas asfálticas do tipo CA e SEMI foram obtidos para as misturas dosadas no chamado <u>teor de projeto</u>, ou seja, no teor que confere às misturas o valor de VV convencional (igual a 4%).



Figura 13. Resultados de resistência à tração (RT) das misturas asfálticas selecionadas

## 5. TRECHO EXPERIMENTAL

A seleção do local de construção do trecho experimental foi baseada em informações prévias obtidas em levantamentos deflectométricos e de defeitos na rodovia (**Tabela 15** e **Tabela 16**). A partir desses dados, selecionou-se um trecho homogêneo, no qual não houvesse variação significativa da estrutura do pavimento. Como o foco da pesquisa está na camada de revestimento asfáltico, a estrutura remanescente foi mantida para todo o trecho (**Figura 14**). A localização do trecho experimental encontra-se na **Figura 15** e compreende o <u>km 511 até o km 512 + 080m</u>, totalizando 1,080km de comprimento.

km do	Hodômetro		Dm1	DD2	De <sup>3</sup>	
referência	km inicial	km final	(10 <sup>-2</sup> mm)	(10 <sup>-2</sup> mm)	(10 <sup>-2</sup> mm)	CV (%) <sup>4</sup>
	503,2	503,4	38,2	12,8	51,0	34
503 -	503,4	503,6	39,8	7,6	47,4	19
	503,6	503,8	40,8	3,9	44,7	10
	503,8	504,0	35,6	4,9	40,5	14
	504,0	504,2	36,2	9,8	46,0	27
504	504,2	504,4	37,8	10,7	48,5	28
	504,4	504,6	36,7	8,2	44,9	22
	504,6	504,8	41,1	8,9	50,9	21
-	504.8	505.0	37.3	6.4	43.7	17

 Tabela 15. Levantamento deflectométrico na rodovia para determinação do local do trecho experimental

 $^{1}$ Dm = deflexão média;  $^{2}$ DP = desvio-padrão das deflexões;  $^{3}$ Dc = deflexão característica;  $^{4}$ CV = coeficiente de variação

Hodômetro		IRI <sup>1</sup>	ATR <sup>2</sup>	AT <sup>3</sup>
Estaca inicial	Estaca final	(m/km)	(mm)	(%)
1	2	3,57	3,88	1,87
2	3	3,57	4,30	1,10
3	4	3,10	5,02	1,53
4	5	2,74	6,69	1,73
5	6	2,75	5,58	0,74
6	7	3,04	4,62	1,91
7	8	2,18	4,34	1,58
8	9	3,98	6,28	2,51
9	10	3,02	4,74	1,53

 Tabela 16. Levantamento de defeitos na rodovia para determinação do local do trecho experimental

<sup>1</sup>IRI = irregularidade longitudinal;  ${}^{2}ATR$  = afundamento em trilha de roda;  ${}^{3}AT$  = área trincada



Figura 14. Croqui do trecho experimental: (a) misturas de concreto asfáltico, (b) mistura de CPA e (c) misturas descontínuas e gap-graded



Figura 15. Mapa de localização do trecho experimental na Autopista Régis Bittencourt

### 5.1. Construção do trecho experimental

A construção do trecho experimental foi realizada em dois dias, onde todas as etapas, desde a fresagem de parte do revestimento antigo da rodovia até a compactação das misturas asfálticas, ocorreram de maneira similar para todos os segmentos propostos, uma vez que havia diferença apenas na composição dos tipos das misturas asfálticas executadas. A ordem de execução por tipo de mistura é mostrada na **Tabela 17**, que também apresenta as características do <u>volume de vazios</u> e <u>teor de projeto de CAP</u>, conforme apresentado e discutido anteriormente.

Após o fechamento e a adequada sinalização da pista, os equipamentos foram deslocados para o local de obra, e deu-se início a realização da fresagem (**Figura 16**). O processo de fresagem foi dividido em duas etapas de 1,9m de largura, totalizando dimensões de 3,8m de largura, 560m de extensão e 5cm de profundidade, exceto no local de aplicação da mistura de CPA, que teve 4cm de espessura e um total de 4,25m de largura, devido ao dispositivo de drenagem superficial externo à rodovia. A fresadora utilizada era do modelo W200 da marca Wirtgen, e a duração total dessa etapa foi de aproximadamente 1h.

Dia	Ordem	Identificação	Tipo de mistura	Volume de vazios de projeto (%)	Teor de projeto de CAP (%)	Extensão (m)	Espessura (cm)
	1	021	CA	4,0	4,7	120	5,0
1	2	024	CA	6,8	4,0	120	5,0
1 —	3	025	CA	2,8	5,2	120	5,0
	4	028	CPA	19,0	4,4	200	4,0
	5	022	SEMI	4,0	5,0	120	5,0
2 —	6	026	SEMI	6,5	4,3	120	5,0
	7	027	SEMI	3,0	5,5	120	5,0
	8	023	GAP	5,6	5,5	180	5,0

Tabela 17. Descrição e ordem de execução das misturas asfálticas no trecho experimental



Figura 16. Fresagem do pavimento: (a) fresadora em operação, (b) material fresado colocado no caminhão e (c) pista após a fresagem

Após a fresagem, realizou-se limpeza do pavimento (**Figura 17**), primeiramente com equipamento do tipo Bobcat, seguido de caminhão aspirador. Com o pavimento fresado limpo, realizou-se a pintura de ligação com emulsão asfáltica (**Figura 18**).



(a)



Figura 17. Limpeza do pavimento: (a) limpeza com Bobcat e (b) limpeza com caminhão aspirador



(a)



Figura 18. Pintura de ligação: (a) caminhão aspergindo emulsão asfáltica e (b) pintura de ligação finalizada

Concomitantemente, a usina da Neovia Engenharia, localizada em Campina Grande do Sul (PR), iniciou o processo de usinagem das misturas asfálticas de acordo com as dosagens realizadas em laboratório. A usina possui equipamentos da marca Ciber, do grupo Wirtgen, conforme mostrado na **Figura 19**. As misturas asfálticas foram então carregadas nos caminhões, com posterior pesagem (**Figura 20**).



Figura 19. Usina da Neovia Engenharia: (a) tambor misturador, possível enxergar a chama para aquecimento dos agregados e (b) tambor de armazenamento da cal, adicionada às misturas asfálticas



Figura 20. Caminhão recebendo carga de mistura asfáltica na usina: (a) início do carregamento; (b) caminhão com carga completa e (c) pesagem do caminhão

Conforme os caminhões chegavam ao local da obra, cerca de 120km distante da usina, iniciavase o processo de execução das camadas de revestimento. Com o pavimento antigo fresado, limpo e com a pintura de ligação realizada, conforme já ilustrado, a vibroacabadora modelo P4820D ABG, da marca Volvo, se posicionava para o recebimento da carga dos caminhões, e então se iniciava o processo de espalhamento da mistura asfáltica (**Figura 21**). O espalhamento foi quando os 5 primeiros caminhões chegaram no canteiro de obras, processo que foi realizado para evitar parada da vibroacabadora, o que poderia prejudicar o pavimento em termos de irregularidade longitudinal.



Figura 21. Massa asfáltica na obra: (a) caminhão descarregando na vibroacabadora e (b) vibroacabadora executando camada de revestimento

Foram necessários três caminhões para as misturas de CA e SEMI, e quatro caminhões para as misturas de CPA e GAP, de acordo com a extensão dos trechos. Para controle tecnológico das misturas asfálticas executadas, retiraram-se amostras durante a execução da camada. Colocou-se uma placa metálica, presa por correntes para que pudesse ser puxada, no meio do caminho por onde passaria a vibroacabadora. Desta placa, retiraram-se amostras de mistura asfáltica. Também se retiraram amostras da vibroacabadora, após passagem da mistura pelo caracol da máquina (**Figura 22**).



Figura 22. Retirada de amostras: (a) placa metálica com mistura; (b) amostras retiradas da placa e (c) amostras retiradas da vibroacabadora

Após passagem da vibroacabadora, a mistura asfáltica foi compactada com passagens de compactador de rolo liso e compactador de pneus (**Figura 23**). Foram utilizados rolos lisos modelo CB44B da marca Caterpillar e modelo BW138AD da marca Bomag e rolos de pneus CP2700 e CP274, ambos da marca Dynapac.



Figura 23. Compactação da mistura: (a) compactador de rolo liso; (b) compactador de rolo liso e de pneus e (c) compactadores de pneus

### 5.2. Controle tecnológico da obra

Durante a construção do trecho experimental, foram coletadas amostras das misturas asfálticas para serem testadas em laboratório no que diz respeito ao controle tecnológico (<u>determinação do</u> <u>teor de ligante asfáltico</u> e <u>verificação da granulometria</u>), bem como a extração de corpos de prova da camada de revestimento após compactada (**Figura 24**).



Figura 24. Coleta de amostras: (a) massa asfáltica solta e (b) extração de corpos de prova

Para determinar o teor de ligante asfáltico da mistura executada em campo, utilizou-se o método da ignição (ASTM D 6307, 2016). Esse método consiste em colocar amostras de 1,5kg em uma estufa do tipo mufla à temperatura de 540°C por um período de 4h. Após esse processo, espera-se pelo resfriamento total das amostras, pesa-se o material, e a diferença de peso encontrada corresponde à massa do ligante que foi queimada. Esse procedimento foi feito para as misturas de acordo com a **Tabela 18**, considerando duas amostras por mistura, faltando apenas a mistura de CPA, cujos resultados não puderam ser obtidos, por questões operacionais. É importante ressaltar

que durante o processo pela ignição, a água de constituição do agregado também foi retirada, fazendo necessária a realização do método da ignição para o agregado virgem.

Tipo de		<b>Teor (%)</b>		Teor	Teor	Diferenca
mistura	Mistura	Amostra 1	Amostra 2	médio (%)	estabelecido (%)	(%)
CA	021	4,7	4,7	4,7	4,7	0,0%
CA+	024	4,2	4,1	4,2	4,0	+0,2%
CA-	025	5,1	5,1	5,1	5,2	-0,1%
SEMI	022	4,7	4,9	4,8	5,0	-0,2%
SEMI+	026	4,2	4,2	4,2	4,3	-0,1%
SEMI-	027	5,3	5,3	5,3	5,5	-0,2%
GAP	023	5,4	5,4	5,4	5,5	-0,1%

Tabela 18. Teor de ligante asfáltico pelo método da ignição

O teor de CAP obtido no controle tecnológico de campo foi muito similar àquele determinado durante a etapa de dosagem, para todas as misturas asfálticas aplicadas. Normalmente, aplica-se na prática uma tolerância de no máximo  $\pm 0,3\%$  entre <u>teor de projeto</u> e <u>teor de campo</u>, o que indica que as misturas asfálticas desta pesquisa passaram pelo critério comumente adotado.

Para verificar se a <u>distribuição granulométrica de projeto</u> condiz com aquela das misturas asfálticas executadas em campo, após a retirada das amostras da mufla, realizou-se o ensaio de granulometria. Inicialmente, para determinação do teor de finos das misturas, fez-se a lavagem do material, utilizando a peneira de N° 200 (0,075mm). A massa perdida nesta lavagem, ou seja, passante na peneira de abertura 0,075mm foi considerada como o filer da granulometria (**Tabela 19**). A **Figura 25** mostra as curvas médias da granulometria obtida para cada mistura asfáltica.

Tipo de mistura	Mistura	Teor médio de filer (%)	Teor de fíler de projeto (%)
CA	021	6,9	7,1
CA+	024	7,1	7,1
CA-	025	7,3	7,1
SEMI	022	6,1	6,1
SEMI+	026	5,8	6,1
SEMI-	027	5,8	6,1
GAP	023	4,3	5,3

Tabela 19. Teor de finos das misturas asfálticas



Página 64 de 285



Figura 25. Distribuição granulométrica das misturas asfálticas aplicadas em campo: (a) concreto asfáltico, (b) semi-descontínua (c) gap-graded

A massa específica aparente das misturas asfálticas compactadas (Gmb) foi obtida a partir de da pesagem de corpos de prova por meio da norma ASTM D 2726 (2017). O processo consiste em pesar o corpo de prova seco (Ms), pesá-lo submerso em água – de preferência à temperatura de  $25^{\circ}$ C – (Msss<sub>sub</sub>), e pesar novamente após retirar da água e secar sua superfície (Msss). Dessa forma, obtém-se três pesos, que são dados de entrada para o cálculo da Gmb, de acordo com a (1). Para esse processo, foram moldados três corpos de prova pelo método Marshall, a partir das massas asfálticas coletadas na obra. A média dos valores obtidos para Gmb é mostrada na **Tabela 20**.

Tipo de mistura	Mistura	Gmb médio (g/cm³)	Gmb de projeto (g/cm³)
CA	021	2,331	2,387
CA+	024	2,353	2,340
CA-	025	2,294	2,397
SEMI	022	2,277	2,377
SEMI+	026	2,255	2,342
SEMI-	027	2,283	2,386
GAP	023	2,239	2,325
СРА	028	PROBLEMA NO ENSAIO	2,027

Tabela 20. Gmb das misturas de acordo com o laboratório e comparação com o projeto

A massa específica máxima medida (Gmm) é dada pela razão entre a massa do agregado com ligante asfáltico e a soma dos volumes dos agregados, vazios impermeáveis, vazios permeáveis não preenchidos com asfalto e total de asfalto. Para obtenção deste valor em laboratório, utilizouse o procedimento com vácuo (ASTM D 2041/2041M, 2011). Esse processo consiste em pesar 1,5kg de amostra de mistura asfáltica em um recipiente de massa conhecida, preencher com água a 25°C até que a mistura fique coberta. Aplica-se então, uma pressão de vácuo residual no recipiente de 30mmHg, isto é, aplicação de 730mmHg, por um período de 15 minutos, com o intuito de retirar o ar existente entre os agregados cobertos por ligante.

Após o vácuo, restabelece-se a pressão ambiente no recipiente, completa-se com água o volume total do recipiente. A partir das massas obtidas neste procedimento, foi possível dar entrada dos dados na **Equação 6**. Dessa forma, a **Tabela 21** apresenta os valores de Gmm para algumas das misturas asfálticas já avaliadas.

$$Gmm = \frac{A}{A + B - C}$$
(6)

Onde: A é a massa da amostra seca em ar;

B é a massa do recipiente com volume completo com água;

C é a massa do recipiente mais a amostra submersa em água.

Tipo de mistura	Mistura	Gmm	Gmm de projeto
CA	021	2,462	2,486
CA+	024	2,483	2,511
CA-	025	2,449	2,466
CPA	028	2,502	2,502
SEMI	022	2,459	2,476
SEMI+	026	2,476	2,505
SEMI-	027	2,437	2,460
GAP	023	2,443	2,463

 Tabela 21. Valores de Gmm obtidos em laboratório e de projeto

Por fim, o controle tecnológico da construção do trecho experimental foi realizado também em relação ao volume de vazios (VVs) das misturas aplicadas (**Tabela 22**). Para essa verificação, foram extraídos corpos de prova da pista logo após a finalização da execução do trecho. Essas amostras foram levadas ao laboratório e pesadas, para determinação do volume de vazios e comparação com os valores dos projetos das dosagens.

Tipo de mistura	Mistura	Volume de vazios de pista (%)	Volume de vazios estabelecido (%)
CA	021	6,1	4,0
CA+	024	9,3	6,8
CA-	025	5,8	2,8
CPA	028	-	19,0
SEMI	022	9,5	4,0
SEMI+	026	9,6	6,5
SEMI-	027	6,8	3,0
GAP	023	9,7	5,6

Tabela 22. Valores de VVs obtidos em laboratório e de projeto

Os valores obtidos para o VV das amostras extraídas de campo não estão de acordo com os valores de projeto, chegando a uma diferença de quase 100% para algumas misturas. É importante salientar, no entanto, que há uma tendência nos valores obtidos quanto ao aumento e à diminuição nos VVs de projeto, ou seja, as misturas asfálticas projetadas para menor valor de VV foram aquelas que tiveram um valor mais baixo desse parâmetro em pista.

# 6. MONITORAMENTO DO TRECHO EXPERIMENTAL

O trecho experimental construído dentro do projeto de pesquisa foi monitorado periodicamente durante o primeiro ano de sua vida útil. Os levantamentos de campo foram divididos em três grandes blocos: <u>levantamento funcional</u>, <u>levantamento estrutural</u> e <u>levantamento da superfície</u>. Normalmente o levantamento funcional de um pavimento asfáltico compreende também a avaliação das condições de sua superfície, porém, para a presente pesquisa, esses dois levantamentos são tratados separadamente. As datas da realização desses levantamentos encontram-se na **Tabela 23**.

<b>Fubera 20</b> . Datas de monitoramento do decino experimientar			
Data	Idade do pavimento	Levantamento	
Junho/2018	0 meses	Funcional, estrutural e superfície	
Outubro/2018	4 meses	Funcional e superfície	
Dezembro/2018	6 meses	Funcional, estrutural e superfície	
Junho/2019	12 meses	Funcional, estrutural e superfície	

Tabela 23. Datas de monitoramento do trecho experimental

Antes da realização dos levantamentos de campo, uma das atividades preliminares realizadas foi a prospecção do pavimento a partir de poço de inspeção, para conhecimento da estrutura original do trecho experimental. O conhecimento dessa estrutura se faz importante para uma melhor análise e entendimento dos dados de campo obtidos durante a pesquisa. A partir da sondagem realizada (**Figura 26**), foi possível determinar as espessuras e os materiais que compunham o pavimento antes da restauração com a construção do trecho experimental (**Figura 27**).



Figura 26. Sondagem do trecho experimental: (a) corte do pavimento e (b) pavimentado cortado



Figura 27. Espessuras e materiais da estrutura do pavimento antes da intervenção: (a) pavimento real e (b) croqui da estrutura antiga

## 6.1. Tráfego

O tráfego do trecho experimental foi monitorado ao longo do primeiro ano de sua vida útil por meio de dados obtidos em uma praça de pedágio localizada próxima a ele. Para a análise do tráfego, foram considerados os veículos comerciais, de acordo com as categorias especificadas pela ANTT: categoria 2, categoria 4, categoria 6, categoria 7 e categoria 8 (Figura 28). A contagem dos veículos comerciais é apresentada mês a mês, desde a construção do trecho experimental até o mês do último levantamento de campo realizado (Figura 29).

Categoria do Veículo	Tipo de Veículo	Rodagem	Eixos
1	Automóvel, caminhonete e furgão		2
2	Caminhão leve, ônibus, caminhão-trator e furgão		2
3	Automóvel e caminhonete com semirreboque	**	3
4	Caminhão, Caminhão-trator, caminhão-trator com semir- reboque e ônibus		3
5	Automóvel e caminhonete com reboque		4
6	Caminhão com reboque e cami- nhão-trator com semirreboque	<b>,</b> ,	4
7	Caminhão com reboque e cami- nhão-trator com semirreboque	<b></b> , <u>et "                                    </u>	5
8	Caminhão com reboque e cami- nhão-trator com semirreboque		6
9	Motocicleta, motonetas e bicicletas motorizadas	రారం రాశు రాశు	2

Figura 28. Categorias de veículos especificadas pela praça de pedágio (ANTT)



Figura 29. Contagem de veículos comerciais

Para determinação do número N (número acumulado de repetições do eixo padrão) da rodovia, foram assumidas algumas hipóteses sobre o tráfego:

- 90% dos veículos comerciais (caminhões e ônibus) trafegam na faixa da direita da rodovia, ou seja, na faixa onde foi construído o trecho experimental;
- 85% dos veículos comerciais trafegam dentro da carga máxima legal por eixo;
- 15% dos veículos comerciais trafegam vazios, sem transporte de carga.

O cálculo do N utilizou as equações de equivalência de carga da USACE (**Tabela 24**) e o valor obtido para 1 ano de vida útil do trecho experimental foi de  $4,65 \times 10^7$ . Considerando um crescimento linear de 2,5%, o número N acumulado previsto ao longo de 10 anos será de  $5,21 \times 10^8$ .

Tipos de eixo	Faixas de cargas (t)	Equações de FEC
Simples	0 - 8	$FEC = 2,0782 \times 10^{-4} \times P^{4,0175}$
Simples	$\geq 8$	$FEC = 1,8320 \times 10^{-6} \times P^{6,2542}$
Tan dama damla	0 - 11	$FEC = 1,5920 \times 10^{-4} \times P^{3,4720}$
Tandem duplo	≥11	$FEC = 1,5280 \times 10^{-6} \times P^{5,4840}$
Tandem triplo	0 - 18	$FEC = 8,0359 \times 10^{-5} \times P^{3,3549}$
	≥18	$FEC = 1,3229 \times 10^{-7} \times P^{5,5789}$

 ${}^{1}P$  = peso bruto total sobre o eixo (tf)

### 6.2. Levantamento funcional

De acordo com a Instrução de Projeto do DER/SP (IP-DE-P00/03, 2006), a avaliação funcional de um pavimento asfáltico é realizada para determinar a capacidade de serventia que o pavimento proporciona ao usuário no momento do levantamento. Essa avaliação tem como objetivo indicar os índices de qualidade do rolamento da via, em termos dos principais defeitos, da irregularidade e da aderência pneu-pavimento. Para a presente pesquisa, esse tipo de levantamento foi realizado em termos de verificação da evolução dos defeitos de deformação permanente e trincamento por fadiga, além da irregularidade longitudinal (conhecida como IRI, do inglês *international roughness index*).

O levantamento de defeitos no trecho experimental foi realizado para obtenção da deformação permanente em termos de afundamento em trilha de roda (ATR) e do trincamento por fadiga (por meio do percentual de área trincada). A avaliação de ATR foi feita por meio do uso de uma treliça padronizada (**Figura 30**) com 1,20m de comprimento na base, de acordo com a norma DNIT 006 (2003). O ensaio consiste em medir as flechas da trilha de roda externa (TRE) e da trilha de roda interna (TRI) em um pavimento asfáltico em estacas determinadas de acordo com o projeto. Para a presente pesquisa, o levantamento de ATR foi feito na TRE e na TRI ao longo de todo o trecho experimental, com pontos levantados a cada 20m. A **Figura 31** traz a evolução dos resultados médios de ATR para cada segmento em cada tempo de monitoramento. É importante ressaltar que não houve levantamento para o <u>tempo = 0 meses</u>, pois considerou-se que, no começo da vida útil do trecho experimental, não havia a ocorrência desse defeito no pavimento. Para efeito das análises dos resultados obtidos, deve-se levar em consideração o volume de vazios e o teor de CAP das diferentes misturas asfálticas em pista, apresentados novamente na **Tabela 25**.


Figura 30. Treliça padronizada para levantamento de ATR em campo



Figura 31. Valores médios de ATR por segmento

Tipo de mistura	Mistura	Volume de vazios de pista (%)	Teor de CAP em pista (%)
CA	021	6,1	4,7
CA+	024	9,3	4,2
CA-	025	5,8	5,1
CPA	028	-	-
SEMI	022	9,5	4,8
SEMI+	026	9,6	4,2
SEMI-	027	6,8	5,3
GAP	023	9,7	5,4

Os segmentos com o pior desempenho em relação à deformação permanente após 12 meses, ou seja, com maiores valores de ATR, foram aqueles com as misturas asfálticas de menores valores de VV (CA- e SEMI-). Isso pode ser explicado pelo teor de CAP utilizado nessas misturas, que foram elevados (5,1 e 5,3%), em comparação com as outras misturas asfálticas de mesma granulometria.

Quando se compara as diferentes misturas asfálticas dentro de uma mesma granulometria, algumas tendências podem ser observadas. Para as misturas com granulometria contínua (concreto asfáltico), aquela com maior teor de CAP (CA-) teve um maior valor de ATR após 12 meses. O inverso não foi observado, ou seja, a mistura asfáltica com menor teor de CAP não necessariamente foi aquela com o menor valor de ATR. Isso pode ser explicado pelo valor elevado de VV para essa mistura (9,3%), o que acabou tendo um efeito sobreposto ao teor de CAP.

Para as misturas asfálticas com granulometria semi-descontínua, aquela com maior teor de CAP (SEMI-) também teve o maior valor médio de ATR em campo. Para essa granulometria, o inverso foi observado, ou seja, a mistura com menor de CAP (4,2%) teve o menor valor de ATR, em comparação com os demais teores. Uma vez que o VV de pista foi praticamente o mesmo para as misturas SEMI e SEMI+ (9,5 e 9,6%), pode-se dizer que esse parâmetro não teve influência na comparação entre essas duas misturas, ou seja, o teor de CAP teve uma influência direta na diferença entre o desempenho de cada uma dessas misturas asfálticas.

Para o segmento composto pela mistura asfáltica do tipo GAP, o valor médio de ATR não foi tão alto apesar do elevado VV e elevado teor de CAP observado para esse material. Nesse caso, a granulometria descontínua ofereceu um bom intertravamento à mistura, melhorando o desempenho à deformação permanente.

É importante observar que houve pontos específicos de medição com valores muito elevados de ATR, conforme mostrado na **Figura 32**, o que faz com que as médias dos resultados do levantamento realizado sejam mais elevadas para alguns segmentos do trecho experimental. Esses altos valores individuais elevaram a média final de ATR para os segmentos CA- e SEMI-.



Figura 32. Valores de ATR em cada ponto de medição

No que diz respeito à verificação da evolução na porcentagem de área trincada (%AT), cuja medição é apresentada na **Figura 33**, são apresentados os valores medidos em campo para todos os segmentos do trecho experimental (**Figura 34**). Esse levantamento foi realizado de forma manual, medindo-se a área das trincas observadas na superfície do pavimento e calculando-se o percentual em relação à área total de cada segmento. O cálculo de %AT consistiu na obtenção da razão entre a área dos blocos de trincas interligadas e a área total de cada segmento do trecho experimental. Para trincas isoladas, a área foi calculada considerando-se uma espessura de trinca de 15cm.



Figura 33. Levantamento de área trincada no trecho experimental: (a) medição da área e (b) exemplo de bloco de trincas interligadas



Figura 34. Evolução da porcentagem de área trincada por segmento

A comparação entre os oito segmentos com diferentes misturas asfálticas indica que o concreto asfáltico com volume de vazios e teor de CAP intermediários (CA), ou seja, mais próximos daqueles valores normalmente adotados em projetos desse tipo de mistura, teve uma melhor resistência ao trincamento por fadiga em comparação às outras misturas asfálticas. Isso indica que a variação nos parâmetros citados (VV e teor de CAP) tem uma influência relevante no desempenho das misturas asfálticas em relação a esse defeito.

A mistura SEMI-, da mesma forma como foi observada para o defeito de ATR, apresentou valores elevados de área trincada total (próximo a 5%). As outras misturas asfálticas de granulometria semi-descontínua (SEMI e SEMI+) também tiveram valores altos de %AT, independente do teor

de CAP e do volume de vazios observados. Isso significa que essa granulometria tem uma tendência a desfavorecer a resistência à fadiga dos revestimentos asfálticos.

Para a mistura asfáltica descontínua (GAP), o valor de %AT foi baixo, o que pode ser explicado tanto pelo teor de CAP e pelo volume de vazios dessa mistura, o que normalmente podem melhorar o desempenho à fadiga. No entanto, comparando essa mistura com aquelas de teor de CAP similar (SEMI- e CA-) e VV próximo (SEMI, SEMI+ e CA), o trincamento observado foi menor, o que pode ser explicado pela granulometria descontínua, o que deve ter conferido uma maior resistência para essa mistura.

## 6.3. Levantamento da superfície

O levantamento da textura superficial em campo foi feito em termos de macrotextura e microtextura, por meio do ensaio de mancha de areia (ASTM E 1845, 2015) e do ensaio de pêndulo britânico (ASTM E 303, 2018), respectivamente, conforme ilustrado na **Figura 35**. Os ensaios foram executados em campo nos tempos de 0, 4 e 12 meses de vida útil do pavimento.



Figura 35. Levantamento de textura superficial em campo: (a) macrotextura e (b) microtextura

Para o ensaio de mancha de areia, o procedimento consiste em depositar, sobre a superfície do pavimento, 25.000mm<sup>3</sup> de microesferas em determinada granulometria (passante na peneira #60 e retido na peneira #80), e, com a utilização de um equipamento normatizado, espalhar o material depositado, em movimentos circulares, até que não haja evolução do tamanho do círculo de microesferas. Neste momento, medem-se quatro valores de diâmetro da forma obtida, calcula-se a média e obtém-se o valor da altura de material depositado na superfície de acordo com a

**Equação 7**. De posse dos valores, pode-se classificar a profundidade média de macrotextura de acordo com a **Tabela 26**.

$$Hs = \frac{4V}{D^2\pi}$$
(7)

Onde: Hs é a profundidade média da macrotextura da superfície (mm);

V é o volume de material granular espalhado (mm<sup>3</sup>);

D é o diâmetro médio da área circular coberta pelo material granular (mm).

Classe	Altura da mancha de areia (mm)	
Muito fina ou muito fechada	$Hs \le 0,20$	
Fina ou fechada	$0,20 < Hs \le 0,40$	
Média	$0,40 < Hs \le 0,80$	
Grosseira ou aberta	$0,80 < Hs \le 1,20$	
Muito grosseira ou muito aberta	Hs > 1,20	
Fonte: DNIT (2006)		

Tabela 26. Classificação da macrotextura de uma superfície de pavimento

Os resultados de macrotextura, em termos de altura de mancha (Hs), são apresentados na **Figura 36**, para 0, 4 e 12 meses após a construção do trecho experimental. É importante ressaltar que não há resultados para a mistura asfáltica do tipo CPA, uma vez que não é possível realizar o ensaio de mancha de areia nesse tipo de material, devido ao seu elevado volume de vazios. O levantamento foi feito em intervalos de 20 em 20m, para cada um dos oito segmentos, intercalando entre a trilha de roda externa (TRE), eixo e trilha de roda interna (TRI) da pista. A **Tabela 27** mostra a classificação média dos pontos levantados para cada um dos segmentos.



Figura 36. Resultados de macrotextura dos segmentos do trecho experimental

Idade do	Mistura asfáltica			
(meses)	СА	CA+	CA-	
0	Média	Média	Média	
4	Média	Média	Média	
12	Média	Média	Média	
Idade do	Mistura asfáltica			
(meses)	SEMI	SEMI+	SEMI-	
0	Grosseira ou aberta	Grosseira ou aberta	Média	
4	Grosseira ou aberta	Grosseira ou aberta	Grosseira ou aberta	
12	Média	Média	Média	
Idade do		Mistura asfáltica		
(meses)		GAP		
0		Grosseira ou aberta		
4		Muito grosseira		
12		Grosseira ou aberta		

Tabela 27. Classificação da macrotextura dos segmentos do trecho experimental

Os resultados obtidos indicam um maior valor médio de macrotextura para o segmento com camada de mistura asfáltica aberta (GAP) em todas as idades de levantamento. Para as demais misturas asfálticas, os valores de altura de mancha foram similares e, devido ao desvio padrão obtido para os resultados de cada segmento, não é possível afirmar que houve tipos de misturas com melhores ou piores resultados de textura superficial.

Nas duas primeiras idades de levantamento (0 e 4 meses), os valores médios de macrotextura das misturas com granulometria semi-descontínua (SEMI, SEMI+ e SEMI-) foram, no geral, superiores àqueles obtidos para as misturas com granulometria contínua (CA, CA+ e CA-). Isso pode indicar que, inicialmente, essa a distribuição granulométrica diferente confere ao pavimento uma melhor aderência pneu/pavimento.

Uma comparação feita entre o levantamento realizado na idade inicial (0 meses) e o levantamento realizado após 4 meses de vida útil do trecho experimental mostra que não houve perda significativa de macrotextura em nenhum dos segmentos analisados, uma vez que os valores médios são muito similares nas duas idades, e, em alguns casos, esses valores aumentaram ao invés de diminuir. Na verdade, isso pode ser explicado pela variação intrínseca ao ensaio, pelos valores de desvio padrão, e devido ao surgimento de alguns defeitos no pavimento, o que pode interferir nos valores obtidos. De uma forma geral, pode-se afirmar que 4 meses de acúmulo de tráfego não foram suficientes para alterar a propriedade de macrotextura dos segmentos construídos, e não há uma tendência clara de perda ou ganho de textura para os diferentes tipos de misturas asfálticas do trecho experimental.

No entanto, após 12 meses de vida útil do pavimento houve uma redução nos valores de macrotextura para praticamente todas as misturas asfálticas avaliadas. Além disso, a mistura do tipo SEMI-, que é aquela com maior teor de ligante e menor volume de vazios, resultou em valores muito baixos de altura de mancha de areia, inclusive ficando abaixo do limite mínimo recomendado pelo DNIT (0,6mm). Isso mostra que essa configuração de volumetria (alto teor de CAP e elevado volume de vazios) pode prejudicar a aderência superficial das misturas asfálticas com passagem do tráfego. Por fim, foi possível observar que a mistura do tipo GAP, após 12 meses, teve uma macrotextura comparável com aquela obtida para as demais misturas asfálticas, mesmo apresentando inicialmente o maior valor entre todas as misturas avaliadas. Isso mostra que não parece haver um ganho real em relação ao uso da granulometria aberta em termos de aderência, uma vez que um ano é pouco em comparação com a vida útil esperada do pavimento.

Para a microtextura, utilizou-se o ensaio de pêndulo britânico. O processo de execução consiste em soltar um braço pendular com a extremidade recoberta em borracha de forma que atrite contra a superfície molhada da amostra. Esse ensaio fornece valor de resistência à derrapagem (VRD), que é classificado conforme a **Tabela 28**.

Classe	Valor de resistência à derrapagem (VRD)		
Perigosa	VRD < 25		
Muito lisa	$25 \le VRD \le 31$		
Lisa	$32 \le VRD \le 39$		
Insuficientemente rugosa	$40 \le \text{VRD} \le 46$		
Medianamente rugosa	$47 \leq VRD \leq 54$		
Rugosa	$55 \leq VRD \leq 75$		
Muito rugosa	VRD > 75		
Fonte: DNIT (2006)			

Tabela 28. Classificação da microtextura de uma superfície de pavimento

O ensaio foi realizado em intervalos de 20m em cada um dos segmentos do trecho, variando entre a TRE, eixo e a TRI da pista, de forma análoga ao que foi realizado para a obtenção da macrotextura. A **Figura 37** traz os resultados médios obtidos, e a **Tabela 29** mostra a classificação média dos pontos levantados para cada um dos segmentos do trecho experimental.



Figura 37. Resultados de microtextura dos segmentos do trecho experimental

Idade do		Mistura asfáltica	
(meses)	СА	CA+	CA-
0	Medianamente rugosa	Rugosa	Medianamente rugosa
4	Medianamente rugosa	Medianamente rugosa	Lisa
12	Medianamente rugosa	Insuficientemente rugosa	Insuficientemente rugosa
Idade do	Mistura asfáltica		
pavimento (meses)	SEMI	SEMI+	SEMI-
0	Medianamente rugosa	Medianamente rugosa	Medianamente rugosa
4	Insuficientemente rugosa	Insuficientemente rugosa	Medianamente rugosa
12	Insuficientemente rugosa	Insuficientemente rugosa	Insuficientemente rugosa
Idade do	Mistura asfáltica		
(meses)	СРА		GAP
0	Medianamente rugo	sa Media	anamente rugosa
4	Lisa		Lisa
12	Medianamente rugo	sa Media	anamente rugosa

Tabela 29. Classificação da microtextura de cada segmento do trecho experimental

Em relação aos resultados de VRD, pode-se concluir que houve uma queda nos valores obtidos em campo, de uma forma geral, para todas os segmentos do trecho experimental, após 4 meses de vida útil do pavimento. Para quase todas as misturas asfálticas, houve uma mudança na classificação de microtextura, levando a uma classe inferior, ou seja, indicando que o pavimento como um todo ficou mais liso após 4 meses de vida útil. Essa queda nos valores de microtextura foi mais acentuada para a mistura asfáltica do tipo descontínua (GAP), uma vez que os valores após 4 meses diminuíram duas classes, de acordo com a classificação apresentada anteriormente (de medianamente rugosa para lisa ou de rugosa para insuficientemente rugosa).

Apesar disso, após 12 meses, as misturas asfálticas do tipo CPA e GAP voltaram a ser classificadas da mesma maneira que foram no início de sua vida útil. Essa variação na classe e nos valores de microtextura para esses dois tipos de misturas pode estar mais associada com a variação observada dentro do procedimento de ensaio, ou seja, com o desvio padrão obtido dentro da amostragem dos pontos levantados. Além disso, de uma forma geral, os valores de microtextura se mantiveram constante entre os tempos de 4 e 12 meses, indicando que a perda dessa propriedade pode ser elevada nos primeiros meses após a construção do pavimento, porém na sequência os valores tendem a se estabilizar, ao contrário do que foi observado para os valores de macrotextura. Além disso, os valores para as diferentes misturas ficaram muito próximos após 12 meses, e isso pode

ser explicado pelo fato de que essa propriedade está mais ligada às propriedades das partículas de agregado, sendo pouco influenciada pela granulometria, pela volumetria e pelo teor de CAP.

O ensaio para obtenção da irregularidade longitudinal (IRI) por meio do uso do perfilômetro a laser foi realizado na TRE e na TRI para os tempos de 0, 4, 6 e 12 meses de idade do trecho experimental. Os resultados apresentados na **Figura 38** indicam que não houve variação dessa propriedade até 6 meses após a construção do trecho experimental. A partir dessa idade, houve um aumento significativo do valor de IRI para quase todas as misturas, exceto para a mistura de concreto asfáltico com teor intermediário de ligante (CA). Essas misturas que apresentaram aumento no valor de IRI pasaram do limite normalmente recomendado de 2,7m/km. A **Figura 39** traz os valores individuais de IRI para cada ponto analisados nos levantamentos realizados em pista. A partir dos valores individuais de IRI em cada ponto de análise, é possível afirmar que algumas medições tiveram valores muito elevados para esse parâmetro, o que acabou elevando a média obtida.



Figura 38. Valores médios de IRI



Figura 39. Valores individuais de IRI: (a) TRI e (b) TRE

## 6.4. Levantamento estrutural

O levantamento estrutural de um pavimento tem como principal objetivo verificar a capacidade de carga da estrutura por meio da obtenção de parâmetros de deformabilidade de suas diversas camadas. Por meio dessa avaliação, é possível inferir a variação da rigidez das camadas e, consequentemente, utilizar os dados obtidos para prever o tempo de vida útil remanescente do pavimento para as condições climáticas e de tráfego que são impostas.

Normalmente, a metodologia para o levantamento estrutural de um pavimento pode ser dividida entre métodos destrutivos e métodos não-destrutivos. O primeiro caso corresponde à extração de amostras de material da via para realização de ensaios laboratoriais. No caso dos métodos não-destrutivos, podem ser utilizados equipamentos de levantamento deflectométrico, que servem para obter a resposta do pavimento em termos à passagem de carga em termos de deflexões.

Os levantamentos deflectométrico no trecho experimental foram realizados por meio do uso do equipamento *falling weight deflectometer* (FWD), ilustrado na **Figura 40**, com objetivo de obter as bacias deflectométricas para os tempos de 0, 6 e 12 meses de vida útil do pavimento, tanto na trilha de roda externa como no eixo. O FWD é um equipamento deflectométrico que aplica uma carga por impacto que simula a passagem de um eixo padrão de um veículo comercial (80kN), trafegando a uma velocidade de 60 a 80km/h (Andrade, 2017). O equipamento registra os deslocamentos recuperáveis verticais que ocorrem na superfície do pavimento, em distâncias do ponto de aplicação de carga, que são previamente estabelecidas. A **Figura 41** apresenta os valores de deflexão máxima (conhecida como D<sub>0</sub>) obtida em cada ponto de análise do trecho experimental.



**Figura 40.** Levantamento deflectométrico por meio de FWD: (a) aplicação da carga e (b) ilustração das deflexões na estrutura do pavimento (Fonte: Bernucci et al., 2007)



Figura 41. Deflexão máxima do trecho experimental: (a) eixo e (b) trilha de roda externa

Os valores deflexão obtidos após 6 meses foram, no geral, superiores aos obtidos logo após a execução do trecho, no entanto é importante pontuar algumas considerações. No levantamento realizado com 0 meses, a temperatura média do pavimento estava em torno de 28°C, enquanto que no levantamento de 6 meses, a temperatura média foi de 61°C, ou seja, os valores de deflexão aos 6 meses foram muito elevados devido à alta temperatura do pavimento e não necessariamente devido à sua má condição estrutural. Isso pode ser evidenciado pelo levantamento realizado aos 12 meses, a partir do qual é possível observar que os valores de deflexão máxima ficaram bem

próximos aos valores obtidos no início da vida útil do pavimento (0 meses). Como a diferença da temperatura entre os dois levantamentos (0 e 12 meses) não foi tão significativa, há indícios de que a condição estrutural do pavimento permaneceu íntegra durante o primeiro ano do trecho experimental.

A **Figura 42** apresenta as bacias deflectométricas médias do trecho experimental aos 0, 6 e 12 meses de construção do trecho experimental, separadas para cada um dos 8 segmentos construídos (com misturas asfálticas distintas), para trilha de roda externa (TRE), com as deflexões de todos os geofones (D<sub>0</sub>, D<sub>20</sub>, D<sub>30</sub>, D<sub>45</sub>, D<sub>60</sub>, D<sub>90</sub>, D<sub>120</sub>). É importante ressaltar novamente que há uma variação na temperatura do pavimento para cada levantamento, ou seja, os valores de deflexão em cada idade são influenciados por esse fator.



Página 87 de 285



Figura 42. Bacias deflectométricas médias do trecho experimental (TRE): (a) 0 meses, (b) 6 meses e (c) 12 meses

Para se analisar as bacias deflectométricas dos segmentos do trecho experimental, é necessário recorrer aos valores de VV obtidos em campo, que são diferentes daqueles de projeto (**Tabela 30**). Optou-se por manter a nomenclatura original das misturas asfálticas para facilitar o entendimento da pesquisa proposta.

Tipo de mistura	Mistura	Volume de vazios de pista (%)	Teor de CAP em pista (%)
CA	021	6,1	4,7
CA+	024	9,3	4,2
CA-	025	5,8	5,1
СРА	028	-	-
SEMI	022	9,5	4,8
SEMI+	026	9,6	4,2
SEMI-	027	6,8	5,3
GAP	023	9,7	5,4

Tabela 30. Valores de VVs e CAP obtidos em laboratório e de projeto

Analisando apenas as bacias correspondentes à TRE, é possível verificar que os segmentos constituídos por misturas asfálticas do tipo concreto asfáltico (CA, CA+ e CA-) em sua camada

superficial possuem as menores deflexões entre todos os segmentos apresentados, nas três idades de levantamento deflectométrico, especialmente após 12 meses.

Em relação à variação nos valores de VV de cada mistura asfáltica, pode-se dizer que as misturas CA e CA-, que têm menores valores para esse parâmetro em pista, em comparação com a mistura com VV elevado (CA+), tiveram deflexões inferiores, o que pode ser explicado pela volumetria. Para as misturas asfálticas com granulometria semi-descontínua, essa tendência foi observada para a mistura asfáltica SEMI+, que teve resultados elevados de deflexão.

Quando se compara as granulometrias contínua e semi-descontínua, independente do VV observado em campo, os resultados indicam maiores valores de deflexão para os segmentos compostos pelas misturas com granulometria semi-descontínua. Isso pode ser explicado pelo empacotamento dos agregados que é gerado quando misturas asfálticas com distribuição granulométrica contínua são usadas. Esse empacotamento ou intertravamento das partículas de agregado resultou em estruturas mais rígidas, ou seja, que devem ter um tempo de serviço mais longo.

Para os casos das granulometrias aberta (CPA) e descontínua (GAP), em todas as idades de levantamento, a mistura asfáltica do tipo GAP teve maiores de deflexão, mesmo tendo um VV menor. Isso pode ser explicado pelo elevado teor de CAP dessa mistura, que foi o maior entre todas as misturas analisadas.

É importante ressaltar que não houve uma tendência clara no comportamento dos diferentes segmentos do trecho experimental, uma vez que a comparação entre as bacias deflectométricas obtidas para as 8 misturas asfálticas distintas foi diferente em cada idade de levantamento. O ranking dos segmentos variou em cada levantamento, não permitindo indicar quais misturas tiveram o melhor comportamento deflectométrico. No entanto, em todos os três levantamentos, as misturas asfálticas com granulometria contínua (CA, CA+ e CA-) tiveram os menores valores de deflexão observados para todo o trecho experimental.

Um dos problemas encontrados durante a análise dos dados obtidos por meio do FWD é que houve uma variação muito elevada para os valores de deflexão e, consequentemente, para as bacias deflectométricas resultantes dos ensaios realizados. A explicação pra essa variação pode ser explicada por possíveis diferenças significativas na estrutura remanescente dos ao longo do trecho experimental. A **Figura 43** mostra as bacias deflectométricas para cada estaca analisada, no tempo de 12 meses. Uma vez que foram feitos ensaios a cada 5m do trecho experimental, foram geradas em média 25 bacias deflectométricas para cada segmento.







Figura 43. Bacias deflectométricas do trecho experimental (TRE) aos 12 meses: (a) CA, (b) CA+, (c) CA-, (d) CPA, (e) SEMI, (f) SEMI+, (g) SEMI- e (h) GAP

### 6.5. Levantamento automatizado do trecho experimental

Aos 6 meses de vida útil do trecho experimental, foi realizado um levantamento funcional e de superfície no trecho experimental utilizando equipamentos automatizados. Para a obtenção da macrotextura dos diferentes segmentos do revestimento asfáltico, foi utilizado o equipamento PavScan, que faz uma digitalização da superfície do pavimento por meio do registro de imagens ao longo do comprimento do trecho em análise. O parâmetro obtido para macrotextura é o *mean profile depth* (MPD), que, de acordo com a norma ASTM E 1845 (2015), pode ser correlacionado com o parâmetro *estimated texture depth* (ETD) por meio da **Equação 8**. Esse valor de ETD tende a ser próximo ao de altura de mancha de areia, obtido pelo ensaio manual de macrotextura normalmente realizado em pista.



MPD é o valor de *mean profile depth* (mm).



Figura 44. Resultados de macrotextura dos segmentos do trecho experimental obtidos por meio do perfilômetro (6 meses)

Para a avaliação da microtextura do trecho experimental, foi utilizado o equipamento *grip tester*, que mede o coeficiente de atrito do pavimento (por meio do parâmetro *grip number*, GN), que é feita utilizando um pneu normalizado montado numa roda parcialmente bloqueada. Durante o ensaio, são medidas as forças horizontal e vertical exercidas no pneu. Para esse ensaio, é utilizada uma película de água, de forma a simular uma situação de pluviosidade. Os resultados de GN para o trecho experimental são mostrados na Figura X.

(8)



Figura 45. Resultados de microtextura dos segmentos do trecho experimental obtidos por meio do *grip tester* (6 meses)

# 7. ENSAIOS ESPECIAIS DE LABORATÓRIO

Esta etapa da pesquisa envolveu ensaios mais avançados realizados em laboratório, chamados aqui de <u>especiais</u>. Esses ensaios são feitos para se ter uma investigação mais detalhada e aprofundada de algumas propriedades dos materiais estudados na pesquisa. Os ensaios especiais são divididos entre <u>ligante asfáltico</u> e <u>misturas asfálticas</u>. Para o ligante asfáltico, os ensaios foram realizados em termos de obtenção de suas propriedades reológicas, e, para as misturas asfálticas, os ensaios foram de obtenção das características de textura superficial e das propriedades mecânicas (rigidez, resistência ao trincamento por fadiga e resistência à deformação permanente).

## 7.1. Ligante asfáltico

Os ensaios especiais realizados no CAP utilizado na composição das misturas asfálticas do trecho experimental foram: (i) obtenção das propriedades reológicas do material não-envelhecimento; (ii) obtenção das propriedades reológicas do material envelhecido; (iii) construção da curva mestra no material não-envelhecido e no material envelhecido; (iv) previsão da resistência à deformação permanente; (v) previsão da resistência à fadiga.

Para ensaios realizados a temperaturas a partir de 40°C, foram moldadas amostras de 25mm de diâmetro e 1mm de *gap* (altura entre as placas do equipamento). Na sequência, essas amostras foram ensaiadas no reômetro de cisalhamento dinâmico (DSR, do inglês *dynamic shear rheometer*). Para ensaios com temperaturas intermediárias e baixas (abaixo de 40°C), foram utilizadas amostras de 8mm de diâmetro e 2mm de gap. A **Figura 46** apresenta a sequência de preparação do ensaio, desde a moldagem da amostra de CAP até o ajuste do *gap* antes da execução do ensaio. As amostras foram preparadas seguindo a norma ASTM D 7175 (2015).



Figura 46. Sequência de preparação do ensaio no reômetro

Inicialmente, foi determinada a zona viscoelástica linear do ligante asfáltico em três condições: (i) não-envelhecido, (ii) envelhecido em curto prazo, e (iii) envelhecimento em longo prazo. O envelhecimento é realizado por meio do uso dos equipamentos *rolling thin film oven* (RTFO) e *pressure aging vessel* (PAV). Essa sequência de envelhecimentos em laboratório visa a simular o que ocorre com o ligante asfáltico tanto durante o processo de usinagem e transporte da mistura asfáltica (curto prazo), como ao longo da vida de serviço do pavimento (longo prazo).

Os ensaios realizados no reômetro consistem na aplicação de uma tensão de cisalhamento, controlada por uma deformação previamente, a depender do tipo de teste a ser feito (**Figura 47**). São definidos também a temperatura e a frequência de carregamento. Ensaios para obtenção das propriedades reológicas e da curva mestra do ligante asfáltico são realizados em tensões baixas, de forma a garantir que o material se mantenha dentro de sua zona viscoelástica linear. Para ensaios para previsão da deformação permanente e da fadiga, a tensão aplicada é maior, uma vez que há a necessidade de levar as amostras à ruptura.

Para a obtenção das propriedades reológicas e construção da curva mestra do ligante asfáltico, os parâmetros analisados são o: (i) <u>módulo de cisalhamento dinâmico ( $|G^*|$ )</u>, que corresponde à rigidez do material nas condições de ensaio; e (ii) <u>ângulo de fase ( $\delta$ )</u>, que corresponde ao atraso entre o pico de tensão e o pico de deformação, conforme mostrado na **Figura 47**. O  $|G^*|$  é calculado por meio da razão entre o pico da tensão aplicada em um ciclo de carregamento e a deformação resultante, e o  $\delta$  é calculado pelo produto entre a frequência angular do ensaio e o tempo de atraso. Materiais puramente elásticos possuem valor de  $\delta$  igual a 0°, materiais totalmente viscosos têm valor de  $\delta$  igual a 90°. Materiais asfálticos, devido à sua característica viscoelástica, o ângulo de fase está na faixa entre 0 e 90°.





**Figura 47.** Representação gráfica da aplicação de cargas no DSR: (a) esquema de aplicação da tensão e (b) gráficos do pulso de tensão e de deformação (Fonte: Bernucci et al., 2007)

O envelhecimento de curto prazo no RTFOT foi realizado por meio da norma ASTM D 2872 (2019), que consiste na simulação de efeitos do calor e do ar em uma amostra de CAP. O tempo de ensaio é de 85min e a temperatura aplicada é de 163°C. Durante o ensaio, há uma injeção de ar na amostra a uma taxa de 4L/min. Já o envelhecimento de longo prazo no PAV, realizado por meio da norma ASTM D 6521 (2019), consiste em aplicar uma pressão de 2,1MPa na amostra de ligante asfáltico durante 20h à temperatura de 100°C.

#### 7.1.1. Zona viscoelástica linear

O ensaio para obtenção da zona viscoelástica linear (LVE) consistiu na varredura de 0,1 a 20% de amplitude de deformação à frequência de carregamento de 10rad/s, conforme preconizado pela norma ASTM D7175 (2015). Essa verificação é feita por meio da variação no valor de |G\*| com o incremento da deformação. A metodologia Superpave considera que o ligante asfáltico está dentro de sua zona viscoelástica linear até a amplitude de deformação na qual há uma redução de no máximo 10% no valor inicial de módulo. As temperaturas adotadas para essa verificação foram de 82°C para amostras não-envelhecidas e amostras envelhecidas em curto prazo, correspondente à temperatura na qual é verificado o potencial do material testado à deformação permanente. Para as amostras envelhecidas em longo prazo, os ensaios foram feitos a 16 e 37°C, o que corresponde à faixa de temperaturas intermediárias (onde a verificação da fadiga é feita na caracterização do ligante asfáltico). A **Figura 48** mostra os resultados de módulo de cisalhamento dinâmico (|G\*|) em função do aumento de deformação ao longo do ensaio, para as três condições (não-envelhecida, envelhecida em curto e em longo prazo).





**Figura 48.** Determinação da zona viscoelástica linear do CAP: (a) amostra não-envelhecida, (b) amostra envelhecida após o RTFOT, (c) amostra envelhecida após RTFOT+PAV a 16°C e (d) a 37°C após RTFOT+PAV

### 7.1.2. Obtenção dos parâmetros Superpave

Após a determinação da zona viscoelástica linear do material estudado, foi obtido o parâmetro Superpave para temperaturas altas, também conhecido como o parâmetro para previsão da deformação permanente ( $|G^*|$ /sen $\delta$ ). É indicado um valor mínimo de 1,0kPa para esse parâmetro, ou seja, quanto maior o valor, maior será a resistência do ligante asfáltico à deformação permanente. A necessidade de se ter um valor elevado desse parâmetro para condições de temperaturas altas é explicada pela obtenção de uma alta rigidez ( $|G^*|$ ), o que ajuda na resistência à deformação, e um baixo valor do ângulo de fase ( $\delta$ ), o que torna o material mais elástico.

A obtenção desse parâmetro é feita a partir de uma varredura de temperatura, com frequência (10rad/s) e amplitude de deformação (12%) fixas, conforme apresentado na **Figura 49**. É importante garantir que o material esteja dentro de sua zona LVE para o nível de deformação aplicada.



**Figura 49.** Parâmetro reológico |G\*|/senδ em diferentes temperaturas para o CAP nãoenvelhecido

Os resultados indicam que o ligante asfáltico teria bom comportamento ao defeito de deformação permanente até a temperatura de 76°C. Em locais onde a temperatura mais alta durante o ano ultrapasse esse valor, não seria apropriada a utilização desse material para compor as misturas asfálticas para a camada de revestimento do pavimento. O parâmetro Superpave para deformação permanente também é obtido para amostras envelhecidas a curto prazo após o ensaio no equipamento de RTFOT. Nessa condição, o valor mínimo exigido é de 2,2kPa. A **Figura 50** mostra os resultados obtidos para diferentes temperaturas.



Figura 50. Parâmetro reológico |G\*|/senδ em diferentes temperaturas para o CAP envelhecido

Para as amostras envelhecidas, pode-se verificar que o valor mínimo exigido de 2,2kPa foi observado nas temperaturas de 70°C e inferiores, ou seja, a temperatura de 76°C não seria mais adequada para classificação do ligante asfáltico analisado.

Para obtenção do parâmetro Superpave em temperaturas intermediárias, também conhecido como parâmetro para previsão da resistência à fadiga ( $|G^*| \times \text{sen} \delta$ ). É indicado um valor máximo de 5.000kPa para tráfego padrão ou 6.000kPa para tráfego pesado/muito pesado/extremamente pesado (AASHTO M 332, 2014). Quanto menor esse valor, mais resistente à fadiga é o material testado, uma vez que valores baixos de rigidez e de ângulo de fase indicam um ligante asfáltico mais flexível e mais elástico. A obtenção desse parâmetro foi feita a partir de uma varredura de temperatura, a uma frequência de 10rad/s e amplitude de deformação de 1% (**Figura 51**).



**Figura 51.** Parâmetro reológico |G\*|× senδ em diferentes temperaturas para o CAP envelhecido em longo prazo

Os resultados indicam que o ligante asfáltico teria bom comportamento quanto a fadiga a partir das temperaturas de 24°C para tráfego médio/pesado/extremo e 25°C para tráfego padrão.

#### 7.1.3. Curvas mestras

A obtenção das curvas mestras do ligante asfáltico para módulo de cisalhamento dinâmico ( $|G^*|$ ) e para ângulo de fase ( $\delta$ ) foi feita por meio do ensaio de varredura de frequência (0,1 a 10Hz) e varredura de temperatura (0 a 80°C), a uma amplitude de deformação de 0,1%, garantindo o teste na zona viscoelástica linear do material. A **Figura 52** apresenta as curvas mestras do módulo de cisalhamento dinâmico ( $|G^*|$ ) e do ângulo de fase ( $\delta$ ) para as três condições de envelhecimento já avaliadas nesse projeto, adotando 40°C como temperatura de referência.



Figura 52. Curvas mestras do CAP: (a) módulo de cisalhamento dinâmico e (b) ângulo de fase

### 7.1.4. Multiple stress creep recovery (MSCR)

Considerando que o parâmetro Superpave para deformação permanente tem sido criticado por não indicar corretamente o comportamento a esse defeito e ter uma baixa correlação com resultados de misturas asfálticas, principalmente modificados por polímero, foi desenvolvido um parâmetro chamado de compliância não-recuperável (Jnr), que tem resultado em boas correlações com misturas e com o campo.

O ensaio de *multiple stress creep recovery* (MSCR) tem como objetivo avaliar o percentual de recuperação, a compliância não-recuperável e a dependência dos ligantes asfálticos, especialmente os modificados, para diferentes níveis de tensão. O ensaio foi realizado por meio da norma ASTM D 7405 (2015), que indica os tempos de fluência e recuperação de 1 e 9s, respectivamente, sob dois carregamentos distintos (100 e 3.200Pa) nas amostras do ligante

asfáltico após envelhecimento de curto prazo através de RTFOT. Os resultados, apresentados na **Figura 53**, foram obtidos por meio da média entre duas amostras ensaiadas para cada temperatura.



Figura 53. Resultados do ensaio de MSCR para o ligante asfáltico

Os valores de Jnr e Jnr<sub>diff</sub> mostram que o aumento da temperatura diminui a resistência do ligante asfáltico à deformação permanente, o que é esperado, uma vez que o material tende a perder rigidez. Além disso, maiores temperaturas também tornam o ligante asfáltico mais sensível à variação da tensão aplicada. Esses resultados são levados em consideração para classificar os ligantes asfálticos em relação ao seu grau de desempenho (PG), que é baseado nas temperaturas máxima e mínima as quais o material pode ser submetido em campo. Para essa classificação, é também levado em consideração o nível de tráfego da rodovia a ser construída com o ligante asfáltico em análise. A partir dos resultados de  $|G^*|$ /sen $\delta$  e do ensaio de MSCR, é possível classificar o CAP da presente pesquisa como <u>PG 76-XX(H)</u> ou <u>PG 70-XX(V)</u> ou <u>PG 64-XX(E)</u>, onde H, V e E significam tráfego pesado, muito pesado e extremo, respectivamente, de acordo com a **Tabela 31**.

### Tabela 31. Classificação do tráfego de acordo com o Superpave

Nível de tráfego	Número N acumulado (AASHTO)	Valor máximo de Jnr a 3.2kPa (kPa <sup>-</sup> <sup>1</sup> )	Valor máximo de Jnr <sub>diff</sub> (%)
Standard (S) - padrão	$< 10 \times 10^{6} e > 70 km/h$	4,5	75,0
Heavy (H) - pesado	10×10 <sup>6</sup> -30×10 <sup>6</sup> ou 20-70km/h	2,0	75,0
Very heavy (V) – muito pesado	$> 30 \times 10^{6}$ ou $< 20$ km/h	1,0	75,0
Extreme (E) - extremo	$> 30 \times 10^6 \text{ e} < 20 \text{km/h}$	0,5	75,0

### 7.1.5. Linear amplitude sweep (LAS)

O ligante asfáltico também foi caracterizado em relação a sua resistência ao dano por fadiga, por meio do ensaio de *linear amplitude sweep* (LAS), que consiste na aplicação de uma varredura de deformação de 0,1 a 30% em uma frequência de 10Hz durante 310s. A ruptura do material é considerada no ponto de máxima tensão de cisalhamento durante o ensaio, e os parâmetros da curva de fadiga são obtidos por meio do *simplified viscoelastic continuum damage* (SVECD) *model*. O ensaio de LAS foi realizado em amostras envelhecidas em longo prazo (por meio do uso do RTFOT e do PAV), uma vez que a fadiga é um defeito de fim da vida útil do pavimento. Deve ser feito em temperaturas intermediárias, onde o fenômeno de fadiga ocorre, e normalmente é adotada uma temperatura entre 10 e 30°C. Em relatórios passados, o ensaio foi realizado a 30°C, e, para o presente relatório, o ensaio foi feito também nas temperaturas de 20 e 25°C. A **Figura 54** mostra os resultados obtidos para médias de duas amostras em cada temperatura.





Figura 54. Resultados do ensaio de LAS em diferentes temperaturas: (a) evolução do ensaio e (b) curva de fadiga

O comportamento das curvas de tensão *versus* deformação indica que, na menor temperatura, ou seja, quando o ligante se encontra mais rígido, há uma maior resistência à aplicação de tensões, porém uma maior fragilidade do material, uma vez que o pico de tensão cisalhante ocorre em uma deformação mais baixa em relação às demais temperaturas testadas. Os resultados indicam um melhor comportamento à fadiga na temperatura de 30°C, na qual o ligante asfáltico encontra-se menos rígido. Essa tendência é típica para ensaios realizados a deformação controlada. Apesar disso, as curvas de fadiga nas três temperaturas testadas ficaram próximas, principalmente para baixos níveis de deformação.

## 7.2. Misturas asfálticas

Os ensaios realizados nas diferentes misturas asfálticas foram divididos entre caracterização mecânica (rigidez, deformação permanente e fadiga) e caracterização da textura superficial.

Em relação aos ensaios mecânicos, foram realizados:

- Caracterização da <u>rigidez</u>, por meio dos ensaios de Módulo de Resiliência (MR) e Módulo Complexo;
- Previsão da resistência à <u>deformação permanente</u>, por meio do ensaio em simulador de tráfego laboratorial; e
- Previsão da resistência ao <u>trincamento por fadiga</u>, por meio do ensaio de flexão em vigota de quatro pontos.

## 7.2.1. Rigidez

O ensaio de MR em misturas asfálticas é realizado por meio da norma ASTM D 7369 (2011). Consiste na aplicação de uma carga repetida no plano diametral de um corpo-de-prova cilíndrico. A carga aplicada, que deve ser baixa para não causar nenhum dano à amostra, gera uma tensão de tração na horizontal, no centro da amostra testada. O deslocamento diametral recuperável (resiliente) na direção horizontal do corpo-de-prova é medido por meio do uso de extensômetro ou de LVDTs. É comum realizar o ensaio de MR em corpos de prova de dimensões similares ao padrão Marshall, ou seja, com altura de 63mm e diâmetro de 100mm. Pode-se usar também amostras extraídas de campo ou de placas asfálticas de laboratório.

O ensaio é realizado à frequência de 1Hz, e cada ciclo de carregamento consistem em 0,1s de aplicação da carga e 0,9s de repouso (ou descarregamento), conforme mostrado na **Figura 55a**. A carga normalmente utilizada corresponde a 30% do valor de RT da mistura asfáltica testada. Inicialmente, há um condicionamento da amostra por 200 ciclos de carregamento. Para o ensaio propriamente dito, são aplicados 500 ciclos de carga, e a média dos valores de MR obtidos para 300, 400 e 500 ciclos é calculada e considerada com o resultado do ensaio. Durante o ensaio, mesmo com a aplicação de cargas muito baixas, há a ocorrência de deslocamentos plásticos, ou seja, além da parcela de deformação elástica (recuperável), há uma parcela de deformação permanente, que não deve ser contabilizada no cálculo do MR **Figura 55b**.



Figura 55. Aplicação de cargas no ensaio de MR: (a) duração dos tempos de carregamento e repouso e (b) parcelas dos deslocamentos resilientes e permanentes durante o ensaio (Fonte: Bernucci et al., 2007)

Os ensaios de MR foram realizados em amostras extraídas de campo à 25°C, temperatura que é comumente adotada para esse tipo de teste, em prensa hidráulica do tipo MTS (**Figura 56**). Para cada tipo de mistura asfáltica, ou seja, para cada segmento do trecho experimental, foram extraídos cinco corpos de prova do eixo da faixa. Após serragem para nivelamento do topo e da base do corpos de prova, foi realizado o ensaio de caracterização da rigidez dos materiais. A mistura CPA não foi analisada devido a pequena espessura do corpo de prova, tornando inviável a realização do ensaio. Além disso, a caracterização da rigidez deste tipo de mistura não possui uma finalidade em termos de projeto e dimensionamento de pavimentos asfálticas, uma vez que se entende que sua utilização não tem função estrutural.



Figura 56. Ensaio de módulo de resiliência: (a) Aparato na MTS (b) Amostra posicionada

Foram determinados dois valores de módulo de resiliência: o instantâneo, calculado pela deformação instantânea recuperável, que ocorre durante a parte de descarregamento de um ciclo do ensaio; e o total, calculado usando a deformação recuperável total, incluindo ambas, recuperação instantânea e deformação recuperável dependente do tempo, durante uma etapa de descarregamento de um ciclo. Para análise dos dados, foram considerados os dois valores de módulo: instantâneo e total (**Figura 57**).

Quanto mais próximos os valores de módulo instantâneo e total, mais rapidamente acontece a recuperação elástica do material quando submetido à ação de cargas, isto é, é desejável que o arranjo de agregados e o tipo de ligante sejam adequados para atender este requisito, especialmente em rodovias com alto volume de tráfego (Brito, 2006; Bernucci et al., 2007).



Figura 57. Módulo de resiliência instantâneo e total dos CPs extraídos de campo
O ensaio de módulo complexo (AASHTO T 342, 2011) é realizado para caracterizar a rigidez das misturas asfálticas levando em consideração suas propriedades viscoelásticas lineares, ou seja, verificando-se os efeitos da variação da frequência de carregamento e da temperatura na rigidez do material testado. O ensaio é conduzido em tensão controlada, com a aplicação de valores baixos de carga que gerem deformações entre 50 e 150 $\mu$ ε. Os carregamentos são aplicados em diferentes frequências (25; 10; 5; 1; 0,5 e 0,1Hz) e temperaturas (4,4; 21,1; 37,8 e 54°C), e o pulso de carga é senoidal aplicado de forma ao corpo-de-prova. O ensaio foi realizado em duas amostras por mistura. A **Figura 58a** traz a representação da aplicação de cargas durante o ensaio. A defasagem entre a aplicação da tensão ( $\sigma$ ) e a resposta do material em termos de deformação (ε) é chamada de ângulo de fase (δ), conforme já detalhado anteriormente na seção referente aos ensaios realizados em amostras do ligante asfáltico. A partir dos resultados obtidos em diferentes temperaturas e frequências, são construídas as curvas mestras de módulo dinâmico ( $|E^*|$ ) e de ângulo de fase (δ) por meio do princípio da superposição tempo-temperatura, conforme mostra a **Figura 58b**.



Figura 58. Ensaio de módulo dinâmico: (a) representação da aplicação de tensão e resposta em termos de deformação e (b) construção da curva mestra

As amostras para realização deste ensaio foram compactadas em laboratório por meio de Compactador Giratório Superpave (CGS), com dimensões de 100mm de diâmetro e 150mm de altura, adotando os parâmetros volumétricos das misturas asfálticas de acordo com o *as built* do trecho experimental. Após compactação, os corpos de prova foram capeados com gesso, a fim de garantir uma superfície lisa de contato entre o atuador e a amostra (**Figura 59**).



Figura 59. Ensaio de módulo complexo (a) amostra capeada com gesso (b) amostra posicionada para ensaio

Para determinação das curvas mestras do módulo dinâmico, foi obtido o *shift fator* para cada temperatura, e as curvas foram então deslocadas para a temperatura de referência de 21.1°C. Para ajustar as curvas, foi utilizado o modelo sigmoidal, proposto por Pellinen et al. (2004). Os resultados para as misturas asfálticas contínuas, descontínuas e semi-descontínuas com variação no valor de VV, são mostras na **Figura 60**.





Figura 60. Curvas mestras de módulo dinâmico das misturas asfálticas: (a) contínua (CA), (b) semi-descontínua (SEMI) e (c) descontínua (GAP)

Para as misturas contínua e descontínua (CA e GAP), a relação da redução no valor de módulo dinâmico com o aumento do volume de vazios ficou evidente. Essa redução na rigidez com o aumento do VV indica que uma maior quantidade de vazios faz com que a mistura asfáltica tenha uma maior flexibilidade, ou seja, uma maior deformação elástica. Como essa tendência foi observada de maneira mais clara para frequências de carregamento mais elevadas, que correspondem a temperaturas baixas, pode-se prever que as misturas asfálticas com menos vazios podem resistir melhor ao trincamento por fadiga. Para baixas frequências, correspondentes a altas temperaturas, não foi possível observar diferenças entre as curvas mestras das diferentes amostras testadas.

Em relação às misturas asfálticas com granulometria semi-descontínua (SEMI), não foi possível observar a mesma tendência, uma vez que as curvas mestras para os quatro diferentes valores de VV ficaram muito próximas e, dependendo da frequência de carregamento, tiveram um *ranking* de módulo dinâmico variável. Essa granulometria parece não ser afetada pela volumetria em termos de rigidez.

## 7.2.2. Deformação permanente

Para a realização do ensaio de previsão de resistência à deformação permanente em laboratório, foi feita inicialmente a produção de placas asfálticas de acordo com os parâmetros de projeto das misturas – previamente apresentados, por meio de mesa compactadora francesa, que faz uso de pneu liso. Essas placas apresentam dimensões finais de 180×500×50mm. Utilizou-se, além do método convencional de compactação, uma metodologia proposta pelo Laboratório de Tecnologia em Pavimentação (LTP), já realizada em outros trabalhos do grupo (Carvalho, 2019). O método consiste na utilização de um processo de vibração intercalado com o método convencional da mesa compactadora, segue as seguintes etapas (**Figura 61**):

- 1. Pré-compactação com o pneu liso;
- Utilização de motovibrador para vibração da mistura por aproximadamente 1min, em uma frequência de 35Hz, com uma placa metálica posicionada em cima da amostra pré-compactada;
- Procedimento de compactação com pneu liso de acordo com a metodologia convencional; e
- Vibração, durante cerca de 30 segundos, numa frequência de 25Hz, com o motovibrador posicionado diretamente na amostra compactada.



Figura 61. Compactação de amostras em laboratório (a) método convencional com pneu liso; (b) método com vibração, motovibrador em cima de placa metálica (c) motovibrador na etapa final, diretamente na amostra

Mistura	Volume de vazios	Teor de ligante	Compactação	
CA	4 0%	1 70/	Padrão	
CA	4,070	4,770	Vibrada	
CA+	6,8%	4 0%	Padrão	
		4,070	Vibrada	
CA-	2,8%	5 20/	Padrão	
		3,2%	Vibrada	
SEMI	4,0%	5 00/	Padrão	
		3,0%	Vibrada	
SEMI+	6,5%	4.20/	Padrão	
		4,3%	Vibrada	
SEMI-	3,0%	5 50/	Padrão	
		3,3%	Vibrada	
GAP	5 (0/	5 50/	Padrão	
	5,6%	5,5%	Vibrada	

Tabela 32. Matriz de amostras fabricadas

Considerando duas amostras por condição, os ensaios de deformação permanente foram realizados no <u>simulador de tráfego</u> do tipo *Laboratoire Central des Ponts et Chaussées* (LCPC), seguindo a norma EN 12697-22 (2003). O procedimento consiste na passagem de um pneu liso,

com pressão de inflação de 0,6MPa, e carga de ensaio de 5kN, sobre a amostra condicionada a 60°C, na frequência de 1Hz, com medições em 100, 300, 1.000, 3.000, 10.000 e 30.000 ciclos acumulados (Figura 62). Os resultados são apresentados na Figura 63, na Figura 64, na Figura 65, na Figura 66, na Figura 67, na Figura 68 e na Figura 69.





Figura 62. Simulador de tráfego LCPC: (a) uma das amostras posicionada com pneu suspenso e (b) medição de afundamentos





**Figura 63.** Resultados de afundamento de trilha de roda para a mistura contínua (CA): (a) compactação vibrada e (b) compactação padrão

Para a mistura asfáltica de concreto asfáltico com teor de volume de vazios intermediário (4,0%) – CA, ambos os tipos de compactação apresentaram o mesmo resultado de afundamento de trilha de roda, de aproximadamente de 4,5%. Uma vez que o concreto asfáltico, mistura de granulometria contínua, em campo recebe compactação com vibração, a não variação de comportamento quanto à deformação permanente pelo processo de vibração em laboratório é condizente.





**Figura 64.** Resultados de afundamento de trilha de roda para a mistura contínua (CA+): (a) compactação vibrada e (b) compactação padrão





**Figura 65.** Resultados de afundamento de trilha de roda para a mistura contínua (CA-): (a) compactação vibrada e (b) compactação padrão

Para as misturas asfálticas de concreto asfáltico com elevado volume de vazios (CA+) e com baixo volume de vazios (CA-), também não houve uma diferença significativa entre os dois tipos de compactação. A comparação entre as três misturas asfálticas com diferentes volumetrias indica que valores muito baixos de vazios levam a valores de ATR que são em torno de 30% inferiores, apesar do elevado teor de CAP, em comparação com as outras misturas. Uma explicação para isso é que a presença de poucos vazios impede uma maior ocorrência de consolidação nas placas asfálticas testadas. Quando se compara as misturas asfálticas com volume de vazios intermediário e elevado, o valor de afundamento obtido foi muito próximo, não podendo indicar que uma das misturas teve uma melhor resistência do que a outra.





**Figura 66.** Resultados de afundamento de trilha de roda para a mistura descontínua (GAP): (a) compactação vibrada e (b) compactação padrão

A mistura GAP produzida por meio da compactação padrão apresenta cerca de 1% de deformação a menos do que a mesma mistura em compactação vibrada após 30.000 ciclos. Esta redução na resistência à deformação permanente ocasionada pelo processo de vibração pode ser relacionada ao método construtivo da mistura do tipo gap-graded.

Para evitar segregação da camada e garantir o esqueleto pétreo do modo desejado, em misturas descontínuas, a compactação em campo é feita apenas com rolo liso estático, sem vibração. Fica evidenciado, portanto, que a adição de um processo de vibração em mistura descontínua, aumenta a suscetibilidade à deformação permanente. Carvalho (2019), em pesquisa com método de compactação vibrado, já havia detectado a baixa resistência à deformação permanente para mistura do tipo gap-graded.



Figura 67. Resultados de afundamento de trilha de roda para a mistura semi-descontínua (SEMI): (a) compactação vibrada e (b) compactação padrão

Houve um aumento no valor de afundamento para a mistura do tipo semi-descontínua (SEMI) com compactação padrão (não-vibrada), porém a diferença foi de apenas 0,3%. A comparação entre as diferentes granulometrias testadas não indica uma melhor resistência à deformação permanente para nenhuma das misturas asfálticas, com o concreto asfáltico tendo os menores valores de deformação, de uma forma geral, porém próximos àqueles obtidos para as outras misturas.



**Figura 68.** Resultados de afundamento de trilha de roda para a mistura semi-descontínua (SEMI+): (a) compactação vibrada e (b) compactação padrão



Figura 69. Resultados de afundamento de trilha de roda para a mistura semi-descontínua (SEMI-): (a) compactação vibrada e (b) compactação padrão

Para as misturas asfálticas com granulometria semi-descontínua, houve uma tendência diferente daquela observada para as misturas de granulometria contínua. A variação no volume de vazios, tanto para mais como para menos, reduziu em aproximadamente 40% o valor de ATR das nas amostras testadas. A explicação para esse fenômeno pode estar associada com o teor de CAP, que foi baixo para a mistura SEMI+, e com o volume de vazios, que foi baixo para mistura SEMI-. Essas características das misturas asfálticas ensaiadas podem melhorar a resistência à deformação permanente.

## 7.2.3. Fadiga

<u>Como parte dos objetivos da presente pesquisa</u>, foi adquirido o equipamento servo-pneumático para realização de ensaios de fadiga em misturas asfálticas por flexão em quatro pontos no CDT/Arteris. O equipamento é da marca IPC Global e, junto a ele, foi adquirido o sistema para controle e aquisição de dados (**Figura 70**). O equipamento foi utilizado durante a pesquisa, na caracterização das misturas asfálticas do trecho experimental.



Figura 70. Equipamento servo-pneumático para ensaio de fadiga: (a) visão geral e (b) amostra sendo ensaiada

O ensaio de fadiga por flexão de quatro pontos e consiste na utilização de uma vigota de mistura asfáltica biapoiada, submetida a um carregamento cíclico do tipo *haversine* no centro da amostra (**Figura 71a**). Essa configuração de ensaio fornece momento fletor máximo constante e esforço cortante nulo no terço médio da amostra (**Figura 71b**).



Figura 71. Ensaio de flexão de quatro pontos: (a) pulso de carga e (b) diagramas de esforço cortante e momento fletor durante o ensaio

Página 122 de 285

Para caracterizar o comportamento das misturas asfálticas quanto a fadiga, realizou-se o ensaio de <u>flexão vigota de quatro pontos</u>, de acordo com a ASTM D 7460 (2010). As amostras utilizadas neste ensaio têm dimensões de 380×63×50mm e são advindas da serragem de placas com dimensões originais de 500×180×100mm compactadas de modo convencional na mesa compactadora do tipo LCPC. Os ensaios foram realizados em diferentes níveis de deformação controlada, e os resultados, apresentados em termos de curvas de fadiga, encontram-se na **Figura 72**.



Figura 72. Resultados de resistência à fadiga para as diferentes misturas

A vida de fadiga das misturas asfálticas do tipo descontínua (GAP) e semi-descontínua com menor volume de vazios (SEMI-) foi a maior entre todas as misturas testadas e teve resultados muito similares entre si, com suas curvas ficando muito próximas uma da outra. Isso pode ser explicado pelo teor de CAP, que foi igual para as duas misturas, combinado com a granulometria delas, que é muito parecida. O volume de vazios não parece ter influenciado na resistência à fadiga.

Na comparação entre as misturas asfálticas de granulometria contínua e de granulometria semidescontínua com volume de vazios acima do convencional (CA+ e SEMI+), também pode-se afirmar que a resistência à fadiga entre essas duas misturas foi muito similar, especialmente para deformações mais baixas. A mistura de concreto asfáltico com baixo volume de vazios (CA-) teve uma vida de fadiga abaixo das demais misturas para deformações de 500µε ou inferiores. Isso pode ser explicado pelo baixo volume de vazios, o que não forneceu à essa mistura uma flexibilidade suficiente para resistir a esse defeito.

# 7.2.4. Textura superficial

A textura superficial das misturas asfálticas foi medida em laboratório por meio dos ensaios de micro- e macrotextura, com o uso dos métodos do pêndulo britânico e da mancha de areia, respectivamente. Com o objetivo de se propor uma previsão de perda de textura das diferentes misturas asfálticas em laboratório devido ao desgaste da passagem do tráfego, as placas foram avaliadas em várias paradas durante o ensaio realizado no simulador de tráfego, que foi apresentado e detalhado anteriormente neste relatório. As paradas foram feitas nos ciclos de 3.000, 10.000 e 30.000 para mancha de areia e 30.000 ciclos para pêndulo britânico. Além disso, os parâmetros de micro e macrotextura foram obtidos nas placas asfálticas não simuladas (0 ciclos de simulação).

Primeiramente, são apresentados os resultados na condição inicialmente (0 ciclos de carregamento) para placas asfálticas compactadas pelo método padrão (P) e pelo método com vibração (V), apresentados anteriormente. Para essa condição inicial, as amostras foram avaliadas em três posições da placa asfáltica, com o objetivo de se verificar se existe uma heterogeneidade nas características da superfície das misturas asfálticas devido ao processo de compactação em laboratório (**Figura 73**). Para esse estudo, houve variação no VV das misturas asfálticas de granulometria contínua e de semi-descontínua, cujos parâmetros volumétricos foram apresentados anteriormente neste relatório.



Figura 73. Resultados de textura superficial em laboratório na condição inicial: (a) macrotextura e (b) microtextura

Os resultados de altura de mancha de areia mostraram que, no geral, as misturas asfálticas de diferentes granulometrias tiveram valores similares de macrotextura (próximos a 1mm), com a mistura aberta (CPA) tendo médias de valores superiores (em torno de 1,25mm). A variação no tipo de compactação foi relevante para as misturas de granulometria contínua (CA) e de granulometria semi-descontínua (SEMI), uma vez que o método com vibração gerou valores de macrotextura inferiores. Para as misturas aberta (CPA) e descontínua (GAP), não houve uma

influência clara da compactação nos resultados obtidos. A comparação entre as diferenças posições de teste de macrotextura nas placas asfálticas indica que não há variação nos resultados obtidos. O valor individual da média para o CPA compactado pelo método padrão (P) aparenta ser um erro de ensaio e não um valor representativo da mistura avaliada.

Quando se analisa a variação na granulometria da mistura asfáltica de granulometria contínua (CA, CA+ e CA-), é possível perceber que maiores volumes de vazios resultam em uma melhor macrotextura, e menores volumes de vazios levam a menores valores de macrotextura. Essa tendência é esperada, porém não é apresentada pelas misturas asfáltica com granulometria semi-descontínua (SEMI, SEMI+ e SEMI-), que teve, no geral, resultados muito próximos de altura de mancha de areia independente do volume de vazios observado para as misturas asfálticas testadas.

Para os ensaios de microtextura, as diferentes posições de avaliação da superficie também não resultaram em resultados muito variáveis. Além disso, não é possível afirmar que diferentes granulometrias geraram valores distintos de VRD, uma vez que os valores médios, considerando todas as posições testadas nas placas foram muito próximos para todas as misturas analisadas. A mudança no método de compactação também não alterou significativamente os resultados. Isso tudo pode ser explicado pelo fato de que a microtextura de uma mistura asfáltica é muito influenciada pelo tipo e forma do agregado, que foi o mesmo para todas as misturas testadas, e não tanto pela granulometria, pelo teor de ligante ou pelo volume de vazios das misturas.

A **Figura 74** apresenta os resultados obtidos para a evolução de macro- e microtextura ao longo dos ciclos de carregamento no simulador de tráfego de laboratório. Para essas análises, apenas a posição central das placas asfálticas, local comumente testado, foi avaliada em termos de textura superficial.

Image: CA- (P) Image: SEMI (V) I	Γ	GAP (V)	GAP (P)	$\blacksquare CA(V)$	□ CA (P)	$\Box CA+(V)$	$\Box CA+(P)$	□CA- (V)
Image: Non-State State St	l	□CA- (P)	■ SEMI (V)	SEMI (P)	■ SEMI+ (V	$V$ ) $\Box$ SEMI+ (P)	□SEMI- (V)	$\Box$ SEMI- (P)
0,98 0,98 0,98   0,92 0,95 0,94 0,93   0,86 1,03 1,05 0,93   0,86 1,03 1,05 0,93   0,86 1,03 0,91 0,87   0,87 0,91 0,87 0,93   0,87 0,91 0,87 0,93   0,87 0,91 0,87 0,93   0,87 0,91 0,87 0,93   0,87 0,91 0,87 0,93   0,88 0,99 0,98 0,94   0,11 0,80 0,82 0,72   0,68 0,82 0,81 0,75   0,090 0,82 0,81 0,75   0,090 0,88 0,82 0,84   0,080 0,88 0,82 0,84						//////////////////////////////////////		
0.92 0.95 0.94 0.94   0.86 1.03 1.05 0.93   0.86 1.03 1.05 0.95   0.87 0.91 0.87 0.95   0.82 1.18 1.19 1.11   0.82 0.99 0.98 0.94   0.80 0.82 0.72 0.72   0.99 0.99 0.97 0.93   0.71 0.80 0.78 0.81   0.68 0.99 0.97 0.93   0.99 0.99 0.98 0.72   0.77 0.82 0.81 0.75   0.77 0.82 0.81 0.75   0.80 0.88 0.82 0.84   0.80 0.88 0.82 0.84				0,98		0,98		0.94
0.86 1.03 1.05 0.93   0.86 0.91 0.87 0.95   0.87 0.87 0.88 0.87   0.86 0.91 0.87 0.84   0.81 0.99 0.98 0.94   0.89 0.80 0.82 0.94   0.71 0.80 0.82 0.94   0.68 0.99 0.97 0.93   0.68 0.99 0.99 0.97   0.68 0.99 0.99 0.97   0.90 0.82 0.81 0.93   0.77 0.82 0.98 0.99   0.99 0.98 0.99 0.97 0.93   0.97 0.82 0.81 0.75 0.97   0.97 0.88 0.82 0.84 0.97   0.98 0.88 0.82 0.84 0.94	_	0,92	1///	0,95		0,94		0,94
0,87 0,91 0,87 0,95   0,82 1,18 1,19 0,84   1,16 0,99 0,98 0,94   0,89 0,80 0,82 0,72   0,80 0,82 0,72 0,72   0,68 0,99 0,97 0,93   0,71 0,80 0,78 0,81   0,68 0,99 0,97 0,93 0,93   0,77 0,82 0,81 0,75   0,77 0,82 0,81 0,75   0,77 0,82 0,81 0,75   0,80 0,88 0.82 0,84   0,80 0,88 0.82 0,84	2	0,86		1,03		1,05		0,93
0.82 1,18 0,01 0,84   0.82 1,18 1,19 1,11   0.89 0,99 0,98 0,94   0.89 0,80 0,82 0,72   0.71 0,80 0,82 0,72   0.68 0,99 0,97 0,93   0.68 0,99 0,97 0,93   0.68 0,99 0,97 0,93   0.68 0,99 0,97 0,93   0,07 0,82 0,81 0,75   0,07 0,82 0,81 0,97   0,80 0,88 0,82 0,84	uu (	0,87	7///	0.91	4	0.87		0,95
1,18 1,19 1,11   0,89 0,99 0,98 0,94   0,89 0,80 0,82 0,72   0,71 0,80 0,78 0,81   0,68 0,99 0,97 0,93   0,68 0,99 0,97 0,93   0,77 0,82 0,81 0,75   0,77 0,82 0,81 0,75   0,77 0,82 0,81 0,75   0,80 0,88 0,82 0,84	eia (	0,82	1				[	0,84
0,89 0,99 0,98 0,94   0,89 0,80 0.82 0,72   0,71 0,80 0,82 0,72   0,68 0,99 0,97 0,81   0,90 0,99 0,97 0,93   0,77 0,82 0,81   0,77 0,82 0,81   0,77 0,82 0,81   0,77 0,82 0,81   0,77 0,82 0,81   0,77 0,82 0,81   0,77 0,82 0,81   0,75 0,97 0,97   0,80 0,88 0,82 0,84	e ar	1116		1,18		1,19		1,11
0,89 0,80 0,82 0,72   0,71 0,80 0,78 0,81   0,68 0,99 0,97 0,93   0,90 0,99 0,97 0,93   0,77 0,82 0,81 0,75   0,77 0,82 0,81 0,75   0,77 0,82 0,81 0,75   0,77 0,82 0,81 0,75   0,80 0,88 0,82 0,84   0,80 0,88 0,82 0,84	la d			0,99		0,98		0.94
0.71   0.80   0.78   0.81     0.68   0.99   0.97   0.93   0.93     0.77   0.82   0.81   0.75     0.77   0.82   0.81   0.75     0.77   0.82   0.81   0.75     0.80   0.88   0.82   0.81	anct	0,89		0,80		0,82		0.72
0,00 0,09 0,99 0,97 0,93   0,77 0,82 0,81 0,75   1,01 1,04 0,98 0,97   0,80 0,88 0,82 0,84   0,80 0,88 0,82 0,84	e mi	0,71		0,80		0,78		0,81
0,80 0,80 0,80 0,80 0,82 0,81 0,81 0,98 0,98 0,98 0,98 0,98 0,98 0,98 0,98 0,98 0,97	a de	0,08	7///	0,99	7 - 7	0,97		0.93
	ltur	0,70		0,82		0,81		0.75
0,80 0,88 0,82 0,84	<b>A</b>		-///	1.04		0.98		0.97
		1,01	<i></i>			0.82		
	_	0,80		0,88				0,84
	_	1,08	<i>\///</i>	1,10		1,17		1,06
1,05 1,09 1,15 1,14		1,05		1,09		1,15		1,14
0 3000 10000 30000 Ciclos		0		3000	Ciclo	10000	3	0000

(a)



Figura 74. Evolução da textura superficial com ciclos de carregamento: (a) macrotextura e (b) microtextura

Para os resultados de mancha de areia, houve uma variação nos valores obtidos para cada número de ciclos testados avaliados, porém esse aumento não parece ter sido significativo. No geral, a simulação de tráfego em laboratório não parece ter alterado a macrotextura das diferentes misturas asfálticas. O método de compactação vibratório gerou resultados inferiores em relação àqueles obtidos para a compactação padrão para todos os ciclos de simulação.

Para o ensaio de pêndulo britânico, os resultados de VRD foram mais afetados na compactação padrão (P), uma vez que a perda de microtextura foi da ordem de 11%, 3% e 13% para as misturas do tipo gap-graded (GAP), concreto asfáltico (CA) e semi-descontínua (SEMI), respectivamente. Para as amostras produzidas por meio da compactação vibratória (V), a perda de microtextura foi de menos de 1% para as misturas GAP e CA e de menos de 8% para a mistura do tipo SEMI. A variação na volumetria das misturas asfálticas de granulometria contínua e semi-descontínua não

resultou em tendências distintas daquelas observadas para as misturas asfálticas com volumes de vazios intermediários.

A textura superficial das misturas asfálticas também foi caracterizada por meio do equipamento *Pavement Texture Analyzer* (PTA), que foi desenvolvido e patenteado pelo LTP/USP. A metodologia de uso desse equipamento consiste na obtenção de um modelo tridimensional da superfície do pavimento, com base na técnica de estereofotometria de reconstrução tridimensional a partir de imagens de sombreamento, na qual a superfície do pavimento é iluminada em diversas direções, enquanto uma câmera imóvel captura imagens de intensidade da superfície do pavimento (Vieira, 2014). A **Figura 75** mostra o equipamento.



**Figura 75.** Pavement Texture Analyzer (PTA): (a) visão frontal do equipamento, (b) equipamento durante execução de ensaio e (c) visão interna durante execução de ensaio

Os parâmetros obtidos por meio da PTA são <u>curtose</u> e <u>assimetria</u>. A curtose mede o achatamento do formato do perfil de textura do pavimento. Valores iguais a 3,0 indicam uma distribuição normal da textura e a classificam como mesocúrtica. A assimetria pode ser positiva ou negativa,

textura positiva apresenta maior aspereza, com picos acima da linha central de análise da superfície, enquanto uma textura negativa apresenta vales, abaixo da linha central.

A **Figura 76** traz os resultados obtidos para as diferentes misturas testadas, antes e depois do uso do simulador de tráfego de laboratório. Todas as misturas asfálticas testadas apresentaram valores de curtose diferentes e menores do que 3,0 (sendo classificadas como platicúrticas), indicando que o perfil de textura é mais achatado do que seria caso a distribuição fosse normal. Houve um aumento nos valores de curtose para as misturas contínuas após a simulação de tráfego e, no geral, uma pequena variação nesses valores para as misturas semi-descontínuas. Isso pode indicar que as misturas contínuas tendem a se aproximar de uma distribuição normal do seu perfil de textura ao longo do acúmulo de passagem de cargas.

No caso da assimetria, todos os valores foram negativos, indicando que as alturas dos vazios que geram a textura superficial dessas misturas estão mais voltadas para baixo. Não se pode afirmar que há uma diferença relevante nos valores obtidos entre as diferentes misturas asfálticas testadas, ou mesmo entre cada mistura antes e depois do uso do simulador, principalmente porque os valores são muito pequenos (da ordem de 0,001 a 0,005).



Figura 76. Resultados da PTA: (a) curtose e (b) assimetria

# 7.2.5. Tomografia

A tomografia tem sido utilizada como uma importante ferramenta para análise da estrutura interna de materiais asfálticos, fornecendo informações como a porosidade, orientação das partículas, contato entre grãos, distribuição de poros no perfil do corpo de prova, e, podem ser utilizados para correlacionar com o comportamento mecânico da mistura.

Dessa forma, a tomografia foi utilizada neta pesquisa com o objetivo de se determinar algumas propriedades dos corpos de prova, como porosidade, volume dos poros (mm<sup>3</sup>), conectividade entre grãos e densidade de conectividade entre grãos (1/mm<sup>3</sup>). Esses dados foram obtidos para os corpos de prova extraídos de campo e são referentes a uma única amostra de cada mistura (**Tabela 33**). A **Figura 77** mostra alguns exemplos de imagens obtidas pelo ensaio, e a **Figura 78**, a **Figura** 

**79**, a **Figura 80**, a **Figura 81**, a **Figura 82** e a **Figura 83** trazem alguns parâmetros relevantes obtidos (porcentagem de poros por faixas de tamanho e quantidade de poros em cada altura do corpo de prova).

Mistura	CA+	CA-	СРА	SEMI+	SEMI-	GAP
Número da amostra	08	13	20	26	35	36
Volume da amostra (mm <sup>3</sup> )	4,43×10 <sup>5</sup>	4,42×10 <sup>5</sup>	3,36×10 <sup>5</sup>	4,01×10 <sup>5</sup>	4,18×10 <sup>5</sup>	3,32×10 <sup>5</sup>
Volume de vazios (%)*	7,50%	3,70%	11,60%	7,70%	5,20%	8,80%
Porosidade (%)	7,98%	3,45%	10,98%	8,86%	4,87%	8,79%

Tabela 33. Dados de obtidos pela tomografia de uma amostra

\*Volume de vazios das amostras obtido por pesagem hidrostática

Os dados obtidos por meio da tomografía mostram que há uma relação entre a porosidade obtida por meio das imagens dos corpos de prova e o volume de vazios medido por meio da pesagem das amostras em laboratório, uma vez que os valores para os dois parâmetros foram muito próximos para todas as seis misturas asfálticas testadas.



Figura 77. Imagens de tomografia das misturas asfálticas: (a) CA+, (b) CA-, (c) CPA, (d) SEMI+, (e) SEMI- e (f) GAP



Figura 78. Parâmetros da tomografia de amostra CA+: (a) histograma de poros e (b) perfil de porosidade



Figura 79. Parâmetros da tomografia de amostra CA-: (a) histograma de poros e (b) perfil de porosidade



Figura 80. Parâmetros da tomografia de amostra CPA: (a) histograma de poros e (b) perfil de porosidade



Figura 81. Parâmetros da tomografia de amostra SEMI+: (a) histograma de poros e (b) perfil de porosidade



Figura 82. Parâmetros da tomografia de amostra SEMI-: (a) histograma de poros e (b) perfil de porosidade



Figura 83. Parâmetros da tomografia de amostra GAP: (a) histograma de poros e (b) perfil de porosidade

A partir dos resultados apresentados, algumas considerações podem ser feitas:

- Quando se faz a comparação entre a mistura asfáltica de granulometria contínua com volume de vazios elevado (CA+) e a mistura com volume de vazios inferior (CA-), observa-se que ambas as amostras tiveram valores próximos de quantidade de poros (média aproximada de 1500 poros em cada altura analisada dos corpos de prova), porém o diâmetro médio dos poros para a mistura CA+ foi superior. Há uma porcentagem elevada de poros com diâmetros de 3 a 12mm. Para a mistura de CA-, mais de 70% dos poros tinham diâmetro médio de no máximo 2,5mm;
- A mesma tendência foi observada para as duas misturas descontínuas com variação no volume de vazios. A mistura com maior volume de vazios (SEMI+) teve uma menor quantidade média de poros por fatia analisada, porém o tamanho desses poros foi maior em relação à mistura com menor volume de vazios (SEMI-).
- Além disso, para as misturas com baixo volume de vazios (CA- e SEMI-), há uma quantidade elevada de poros no topo e na base dos corpos de prova, enquanto que isso não foi observado para as misturas com volume de vazios alto, nas quais a quantidade de poros foi muito similar para todas as fatias das amostras.

# 8. CONCLUSÕES, CONSIDERAÇÕES FINAIS E PRODUTOS

Esta pesquisa teve como <u>principal objetivo</u> analisar soluções distintas de camadas asfálticas de rolamento para a restauração de pavimentos asfálticos visando durabilidade adequada e o atendimento da textura superficial. Para isso, foram testados diferentes tipos de misturas asfálticas, com variação em sua granulometria e em sua volumetria (a partir da variação no teor de ligante asfáltico, e consequentemente, do volume de vazios).

As <u>principais técnicas</u> utilizadas nesta pesquisa foram o estudo laboratorial e a aplicação das misturas asfálticas propostas como restauração da camada de revestimento asfáltico de um trecho experimental em rodovia de alto volume de tráfego, contato com elevado percentual de veículos comerciais. Os <u>métodos</u> adotados para a variação do tipo das misturas asfálticas foram: (i) adoção de diferentes granulometrias e (ii) a mudança no teor de ligante asfáltico para algumas dessas granulometrias, permitindo uma mudança na sua volumetria (volume de vazios). Não se optou, nesta pesquisa, por modificar a energia de compactação adotada para a produção dos revestimentos asfálticos, tanto em campo como em laboratório, pois se procurou reproduzir trabalhos de campo que atendessem aos requisitos técnicos de equipamentos e procedimentos de compactação adequados. A variação de volumetria se dá, portanto, pelo teor de ligante asfáltico empregado e não por deficiência no procedimento executivo de compactação. Dessa forma, o teor de ligante asfáltico foi variável a ser considerada nas análises. Note-se que a variação de teor asfáltico é uma realidade na produção de misturas asfálticas devido a variações passíveis de ocorrerem em usina.

Em relação às considerações finais obtidas a partir desta pesquisa, estas são apresentadas em dois grandes grupos: <u>durabilidade</u> e <u>textura superficial</u>, por serem os dois objetivos principais deste projeto de pesquisa, de modo a embasar decisões de concessionárias e órgãos rodoviários na seleção de misturas asfálticas para comporem camadas de rolamento asfálticas em obras de restauração de pavimentos. Para isso, são analisados os resultados obtidos tanto por meio de ensaios de laboratório, como dos ensaios realizados no trecho experimental.

#### 8.1. Considerações finais

## 8.1.1. Durabilidade

Em relação ao afundamento em trilhas de roda, pode-se dizer que a mudança na volumetria (variação de teor de asfalto) das misturas asfálticas de granulometrias contínua e semi-descontínua provoca uma variação no comportamento à deformação permanente dos materiais testados em

laboratório. Para a mistura asfáltica de granulometria contínua e bem distribuída (concreto asfáltico), que é a mais utilizada em rodovias brasileiras, há um ganho de durabilidade em termos de deformação permanente quando o volume de vazios está ligeiramente abaixo do convencional. Esse tipo de resultado é interessante e reproduz a teoria de comportamento mecânico de misturas asfálticas, com relação à variação de teor de ligante asfáltico. De outro lado, o baixo volume de vazios obtido por um teor de ligante asfáltico mais elevado, pode causar aumento no potencial de deformação permanente, como é normalmente esperado. No caso desta pesquisa, o aumento na quantidade de asfalto não causou importante redução de resistência à deformação permanente, demonstrando que o travamento do esqueleto sólido bem projetado (granulometria adequada) e o uso de ligantes asfálticos modificados de forma conjugada possibilitam a variação positiva de teor de ligante e redução de volume de vazios sem causar problemas de afundamentos precoces. Este resultado tem aplicação prática direta.

Para a mistura asfáltica com granulometria semi-descontínua, há ganho na resistência à deformação permanente para a volumetria com maior e menor volume de vazios. Ou seja, esta granulometria é positiva em termos de durabilidade e resistência ao afundamento, mesmo com variações de teores de asfalto (dentro do especificado como aceitável), na produção de misturas asfálticas. Não é possível afirmar que a granulometria semi-descontínua, que tem como objetivo fornecer um melhor arcabouço dos sólidos (os grãos de agregados), melhorou essa propriedade da mistura asfáltica, uma vez que sua deformação permanente foi muito similar àquela obtida para as outras misturas asfálticas testadas. Mais uma vez, o uso de ligantes asfálticos modificados compensa eventuais diferenças que a granulometria poderia demonstrar.

Em campo, pôde ser observada a sensibilidade às variações de teores quanto a deformação permanente. Para as misturas asfálticas utilizadas no trecho experimental, o teor de ligante asfáltico exerceu influência no desempenho à deformação permanente, com teores mais elevados de CAP levando a maiores valores de afundamento em trilha de roda. Este fato mostra que o processo de pista, com o excesso de ligante conjugado com alguma limitação no processo construtivo, sem reproduzir o que o laboratório indicou para atividade, pode causar redução de durabilidade em relação a esta propriedade. Além disso, a utilização de granulometria semi-descontínua, e mesmo a descontínua (como o gap-graded), não apresenta benefícios em relação a este defeito, tendo a mistura asfáltica de granulometria contínua (concreto asfáltico) o melhor desempenho mecânico dentre as testadas. Possivelmente, o intertravamento conseguido na

granulometria contínua e bem-graduada e o uso de ligante modificado por polímero foram muito positivos, aliado ao processo correto de produção em usina e compressão em pista.

Em relação ao defeito de trincamento por fadiga, a utilização de granulometria semi-descontínua e descontínua traz um aumento na resistência das misturas asfálticas, em comparação com a mistura asfáltica mais tradicional (granulometria contínua), especialmente para volume de vazios baixos, ou seja, com teor de ligante elevado. Em campo, no entanto, esse ganho não é observado para as misturas asfálticas com granulometria semi-descontínua, que se comportam de forma deficiente neste aspecto, em comparação com os demais revestimentos asfálticos. O processo de trincamento observado em campo não está associado apenas à mistura asfáltica aplicada. Tem-se ainda as questões relacionadas a estrutura de pavimento como um todo, além de aspectos relativos à drenagem, visto que o trecho experimental se encontra em uma grande área de corte, o que pode possibilitar uma progressão rápida de defeitos, não possibilitando isolar o comportamento apenas do revestimento asfáltico neste caso.

Cabe ressaltar que durante o período desta pesquisa ocorreu um processo de instabilização do talude lateral ao trecho experimental. Por este motivo, houve necessidade da realização de obras emergenciais, com trânsito de maquinário pesado, o que pode ter influenciado nos resultados obtidos. Trata-se de um fato atípico, que foge do controle dos pesquisadores.

## 8.1.2. Textura superficial

Para as propriedades de textura superficial, que são caracterizadas por meio de parâmetros de macro e microtextura, a variação na distribuição granulométrica das misturas asfálticas resulta em melhores resultados laboratoriais de mancha de areia (macrotextura) para as granulometrias aberta e descontínua. A comparação entre diferentes volumetrias, dentro de uma mesma granulometria, traz melhores resultados de macrotextura para as misturas asfálticas com volume de vazios elevado e piores resultados para as misturas com menor volume de vazios. Pode-se observar a maior tendência, como era de se esperar, que as misturas contínuas e bem-graduadas estão no limite mínimo ou próximo dele das especificações de macrotextura do PER. Este fato corrobora a dificuldade de atendimento deste parâmetro com concretos asfálticos usualmente empregados no Brasil.

No que diz respeito à microtextura, não há uma clara influência da granulometria ou da volumetria nesse parâmetro, principalmente porque o tipo de agregado acaba se sobrepondo às propriedades das misturas asfálticas em relação a essa característica.

Em campo, tendências similares para o parâmetro de macrotextura podem ser observadas, uma vez que, com o acúmulo do tráfego, as misturas asfálticas com os melhores desempenhos são as de granulometria descontínua (gap-graded), e as misturas com pior desempenho são aquelas de granulometria contínua e semi-descontínua com baixo volume de vazios.

## 8.2. Escolha da mistura asfáltica para restauração da camada de rolamento

Após a realização das atividades propostas pelo presente projeto de pesquisa, pode-se afirmar que a adoção de uma mistura asfáltica com granulometria semi-descontínua, que é uma solução proposta pela concessionária para melhorar o desempenho mecânico do pavimento asfáltico, mantendo sua textura superficial adequada, mostrou que o desempenho mecânico pode ser alcançado quanto à durabilidade (preservadas as respostas estruturais adequadas e de drenagem), porém ainda demonstram que, quanto à textura, os valores de macrotextura estão próximos ao limite mínimo estipulado pelas normas.

A mistura asfáltica do tipo concreto asfáltico com volume de vazios em torno de 4%, amplamente utilizada em rodovias de alto volume de tráfego no Brasil, mostrou-se adequada, e neste estudo de campo, comparando todas aquelas estudadas, seu desempenho mecânico (deformação permanente e fadiga) mostrou-se adequado, além de manter uma textura superficial com valores que cumprem os requisitos exigidos, porém no mínimo exigido, sem perdas consideráveis com o acúmulo do tráfego. Ressalta-se o que o uso de ligante modificado propiciou bons resultados quanto à durabilidade.

#### 8.3. Utilidade prática do projeto e desvantagens

A <u>principal utilidade prática</u> que o presente projeto trouxe, e que está diretamente ligado à contribuição técnica da pesquisa realizada, diz respeito ao fornecimento de dados que comparam diferentes soluções de restaurações de camadas de rolamento para pavimentos asfálticos em relação aos seus principais defeitos e à sua condição superficial, que está diretamente ligada a segurança viária. Os resultados obtidos podem servir como base para que o projetista possa fazer uma melhor seleção granulométrica e volumétrica das misturas asfálticas a serem adotadas em

rodovias com o objetivo de atender os critérios de textura superficial exigidos pelas normas, mantendo um bom desempenho da camada.

Entre as <u>principais desvantagens</u> do projeto, afirma-se que o estudo realizado em um trecho experimental traz alguns aspectos que podem influenciar diretamente os resultados obtidos durante a pesquisa. O principal deles é a variação observada para os dados levantados em campo, principalmente em termos de textura superficial, onde a média de valores nem sempre representa bem o conjunto de dados do segmento levantado. Indica-se um estudo estatístico mais aprofundado para melhor caracterizar as misturas asfálticas adotadas no trecho experimental. Neste aspecto, trechos experimentais relativamente curtos causam problemas executivos, refletidos no IRI e na homogeneidade do processo construtivo.

## 8.4. Transferência de tecnologia e conhecimento dos produtos

A pesquisa demonstrou a importância de caracterização de toda a estrutura remanescente em estudos para definição de restauração de pavimentos asfálticos, inclusive quanto à drenagem. Outro fator a se realçar é a necessidade de determinação de características dos materiais e das misturas asfálticas, em laboratório, de maneira a ter domínio das variações que possam ocorrer na produção das misturas em usina e na execução em pista. O trabalho foi executado conjuntamente entre a Universidade de São Paulo e a Concessionária Autopista Regis Bittencourt da ARTERIS, com a participação ativa do Centro de Desenvolvimento Tecnológico da Arteris, o que enriquece a formação dos alunos e pesquisadores em contato com a prática da engenharia, da mesma forma que traz para os técnicos da concessionária aspectos a serem levados em conta em seus projetos, de maneira a reduzir perdas e insucessos.

#### 8.5. Viabilidade econômica

Sobre a viabilidade econômica dos materiais e tecnologias estudados, assim como o seu custobenefício, sua produtividade e eficiência, ressalta-se que a análise de viabilidade econômica é ampla e requer avaliação aprofundada do ciclo de vida dos materiais, levando em consideração ainda o contexto onde os mesmos foram aplicados. Essa avaliação não fez parte do escopo e dos objetivos do projeto, tendo ficado fora das análises por essa razão. Entende-se, porém, que esse é um assunto bastante relevante e que dentro do cenário nacional de infraestrutura rodoviária, buscam-se soluções que sejam relevantes do ponto de vista <u>técnico</u> (associado à durabilidade e, consequentemente, a um menor número de intervenções na via), <u>econômico</u> (ligado ao preço dos materiais) e <u>social</u> (diretamente ligado à segurança dos usuários e, portanto, às condições de superfície desses pavimentos).

Os dados levantados, tanto em laboratório como em campo, são referentes aos materiais empregados neste projeto (tipo de agregado e ligante asfáltico), bem como aos condicionantes da rodovia em questão (condições de suporte, geometria da via, condições de drenagem, entre outros). A extrapolação deles para outros cenários deve ser feita com cautela, a fim de evitar erros de análise.

# **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

AASHTO M 332. Specification for performance-graded asphalt binder using multiple stress creep recovery (MSCR). American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, DC, 2014.

AASHTO T 342. Standard Method of Test for Determining Dynamic Modulus of Hot Mix Asphalt (HMA). American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, DC, 2011.

ABNT/NBR 6296. Produtos betuminosos semi-sólidos – Determinação da massa específica e densidade relativa. Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2004.

ABNT/NBR 6465. Agregados – Determinação da abrasão "Los Angeles". Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1984.

ABNT/NBR 6560. Ligantes asfálticos – Determinação do ponto de amolecimento - Método do anel e bola. Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2016.

ABNT/NBR 6576. Materiais asfálticos – Determinação da penetração. Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2007.

ABNT/NBR 11341. Derivados de petróleo – Determinação dos pontos de fulgor e de combustão em vaso aberto Cleveland. Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2014.

ABNT/NBR 12052. Solo ou agregado miúdo – Determinação do equivalente de areia – Método de ensaio. Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1992.

ABNT/NBR 15085. Corrosão atmosférica – Determinação do tempo de superfície úmida em superfícies metálicas expostas à atmosfera. Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2004.

ABNT/NBR 15184. Materiais betuminosos – Determinação da viscosidade em temperaturas elevadas usando um viscosímetro rotacional. Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2004.

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. Dissertação de mestrado, Universidade de São Paulo, SP, 2016.

APS, M. Classificação da aderência pneu-pavimento pelo índice combinado IFI - International Friction Index para pavimentos asfálticos. Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 2006.

ARTERIS D 4791. **Partículas chatas, alongadas ou chatas e alongadas no agregado graúdo**. CDT – Centro de Desenvolvimento Tecnológico, 2014.

ARTERIS ET 323. Projeto volumétrico Superpave de mistura. CDT – Centro de Desenvolvimento Tecnológico, 2004.

ARTERIS T 27. Análise granulométrica de agregados finos e graúdos. CDT – Centro de Desenvolvimento Tecnológico, 2014.

ARTERIS T 84. Massa específica e absorção de agregados finos. CDT – Centro de Desenvolvimento Tecnológico, 2016.

ASTM D 2041/D 2041M. Standard test method for theoretical maximum specific gravity and density of bituminous paving. American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, 2011.

ASTM D 2726/D 2726M. Standard test method for bulk specific gravity and density of nonabsorptive compacted asphalt mixtures. American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, 2017.

ASTM D 2872. Standard Test Method for Effect of Heat and Air on a Moving Film of Asphalt (Rolling Thin-Film Oven Test). American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, 2019.

ASTM D 6307. Standard test method for asphalt content of asphalt mixture by ignition method. American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, 2016.

ASTM D 6521. Standard Practice for Accelerated Aging of Asphalt Binder Using a **Pressurized Aging Vessel (PAV)**. American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, 2019.

ASTM D 7175. Standard test method for determining the rheological properties of asphalt binder using a dynamic shear rheometer. American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, 2015.

ASTM D 7369. Standard Test Method for Determining the Resilient Modulus of Bituminous Mixtures by Indirect Tension Test. American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, 2011.

ASTM D 7405. Standard test method for multiple stress creep and recovery (MSCR) of asphalt binder using a dynamic shear rheometer. American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, 2015.

ASTM D 7460. Standard test method for determining fatigue failure of compacted asphalt concrete subjected to repeated flexural bending. American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, 2010.

ASTM E 303. Standard test method for measuring surface frictional properties using the British pendulum tester. American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, 2018.

ASTM E 1845. Standard practice for calculating pavement macrotexture mean profile depth. American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, 2015.

ASTM E 1926. Standard practice for computing international roughness index of roads from longitudinal profile measurements. American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, 2015.

ASTM E 965. Standard test method for measuring pavement macrotexture depth using a volume technique. American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, 2015.
BASTOS, J.B.S.; BORGES, R.L.; SOARES, J.B.; KLINSKY, L.M.G. Avaliação em laboratório e em campo da deformação permanente de pavimentos asfálticos do Ceará e de São Paulo. Revistas Transportes, Vol. 23, N. 3, p. 44-55, 2015.

BENSON, F.J. Effects of aggregate size, shape, and surface texture on the properties of bituminous mixtures – a literature survey. 47th Annual Meeting of the Highway Research Board, No. 109, p. 12-22, 1970.

BERNUCCI, L.L.B.; MOTTA, L.M.G.; CERATTI, J.A.P.; SOARES, J.B. Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros. 1a. ed., Rio de Janeiro: ABEDA, 2007.

BRITO, L.A.T. Avaliação e análise paramétrica do ensaio de compressão diametral sob cargas repetidas em misturas asfálticas. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS. 2006.

CARVALHO, F.S. Análise da textura superficial de pavimentos asfálticos e sua influência na ocorrência de acidentes de tráfego rodoviário em condição de pista molhada. Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo, SP, 2019.

CCR – Companhias de Concessões Rodoviárias. Estudo comparativo do comportamento de fadiga de misturas betuminosas com diferentes teores de asfalto. Relatório Final, 2010.

DANTAS NETO, S.A.; FARIAS, M.M.; PAOS, J.C. Comportamento mecânico de misturas asfálticas de graduação descontínua (gap graded). 180. Encontro de Asfalto, Rio de Janeiro, RJ, 2006.

DER IP-DE-00/003. Instrução de projeto: avaliação funcional e estrutural de pavimento. Departamento de Estradas e Rodagem do Estado de São Paulo. São Paulo, 29p., 2006.

DNIT. **Manual de restauração de pavimentos asfálticos**. – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, 2<sup>a</sup> ed., Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2006.

DNIT 006. Avaliação objetiva da superfície de pavimentos flexíveis e semi-rígidos – **Procedimento**. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, Rio de Janeiro, 2003.

DNIT 031. **Pavimentos flexíveis – Concreto asfáltico – Especificação de Serviço**. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, Rio de Janeiro, 2006.

DNIT 129. Cimento asfáltico de petróleo modificado por polímero elastomérico – Especificação de material. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, Rio de Janeiro, 2011.

DNIT 136. Pavimentação asfáltica – Misturas asfálticas – Determinação da resistência à tração por compressão diametral – Método de ensaio. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, Rio de Janeiro, 2010.

DUNFORD, A. Friction and the texture of aggregate particles used in the road surface course. Tese de Doutorado, University of Nottingham, 2013.

ELKHALIG, Y.G.; NAPIAH, M.B.; KAMARUDDIN, I. The effect of aggregate packing interlocking on the performance of bituminous mixtures. Recent Advances in Engineering, 2012.

EN 12697-22. Bituminous mixtures – tests methods for hot mix asphalt – part 22: wheel tracking. CEN, Brussels, 2003.

HAFEEZ, I.; KAMAL, M.A.; MIRZA, M.W. An experimental study to select aggregate gradation for stone mastic asphalt. Journal of the Chinese Institute of Engineers, Vol. 38, No. 1, p. 1-8, 2015.

HUANG, Y.H. Pavement analysis and design. Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, USA, 1993.

KARGAH-OSTADI, N.; HOWARD, A. Monitoring pavement surface macrotexture and friction. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No. 2525, 2015.

LEANDRO, R.P. Avaliação do comportamento mecânico de corpos de prova de misturas asfálticas a quente resultantes de diferentes métodos de compactação. Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 2016.

LIU, Y.; HAN, S.; ZHANG, Z.; XU, O. **Design and evaluation of gap-graded asphalt rubber mixtures**. Materials & Design, Vol. 35, p. 873-877, 2012.

MAGNONI, M.; GIUSTOZZI, F.; TORALDO, E.; CRISPINO, M. Evaluation of the effect of aggregates mineralogy and geometry on asphalt mixture friction. Journal of Civil Environmental Engineering, Vol. 6, No. 3, 2016.

MELLO, L.G.R.; FARIAS, M.M.; KALOUSH, K.E. Using damage theory to analyze fatigue of asphalt mixtures on flexural tests. International Journal of Pavement Research and Technology, 2018.

MOGHADDAM, T.B.; KARIM, M.R.; ABDELAZIZ, M. A review on fatuigue and rutting performance of asphalt mixes. Scientific Research and Essays, Vol. 6, No. 4, p. 670-682, 2011.

MOURA, E. Estudo da deformação permanente em trilha de roda de misturas asfálticas em pista e em laboratório. Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 2010.

MUNHOZ, D.; FILLA, J.C. Avaliação do desempenho da recuperação de pavimentos tratados com o microrrevestimento. Revista Técnico-Científica do CREA-PR, 2017.

NEVES FILHO, C.L.D. Avaliação laboratorial de misturas asfálticas SMA produzidas com ligante asfalto-borracha. Dissertação de mestrado, Universidade de São Paulo, SP, 2004.

ONGEL, A.; HARVEY, J. Analysis of 30 years of pavement temperatures using enhanced integrated climate model (EICM). Draft Report UCPRC-RR-2004/05. California Department of Transportation; University of California Pavement Research Center, Institute of Transportation Studies, Davis and Berkeley, 2004.

ONGEL, A.; KOHLER, E.; LU, Q.; HARVEY, J. Comparison of surface characteristics and pavement/tire noise of various thin asphalt overlays. Transportation Research Board 86th Annual Meeting, Washington, DC, 2007.

PELLINEN, T.K.; WITCZAK, M.W.; BONAQUIST, R.F. Asphalt mix master curve construction using sigmoidal fitting function with non-linear least squares optimization. Advances in Materials Characterization and Modeling of Pavement Systems, 2004.

PEREIRA, C.A.; SOARES, J.B.; PONTES FILHO, I.D.S.; CASTELO BRANCO, V.T.F. Análise das correlações existentes entre as medidas de aderência pneu-pavimento avaliadas em campo e em laboratório. Revista Transportes, Vol. 20, No. 4, 2012.

PRIEST, A.L.; TIMM, D.H. Methodology and calibration of fatigue transfer functions for mechanistic-empirical flexible pavement design. USA: National Center for Asphalt Technology, 2006.

RAMOS, F.R.Q. Aplicação de SMA (Stone Matrix Asphalt) em pavimentos aeroportuários – estudado de caso: aeroporto de Aracaju-SE. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Ouro Preto, MG, Brasil, 2015.

REZAEI, A.; MASAD, E.; CHOWDHURY, A. Development of a model for asphalt pavement skid resistance based on aggregate characteristics and gradation. Journal of Transportation Engineering, Vol. 137, No. 12, p. 863-873, 2011.

ROBERTS, F.L.; KANDHAL, P.S.; BROWN, E.R.; LEE, D.Y.; KENNEDY, T.W. Hot Mix Asphalt Materials, Mixture Design and Construction. 2nd. ed., National Asphalt Pavement Association Education Foundation, 1996.

SENGOZ, B.; ONSORI, A.; TOPAL, A. Effect of aggregate shape on the surface properties of flexible pavement. KSCE Journal of Civil Engineering, Vol. 8, No. 5, p. 1364-1371, 2014.

SERDÃO, E.; CAPITÃO, S.; ALMEIDA, A.; PICADO-SANTOS, L. Atrito superficial de camadas betuminosas que incorporam agregados de seixo britado. 70. Congresso Rodoviário Português, Lisboa, Portugal, 2013.

SHAH, S.M.R.; ABDULLAH, M.E. Effect of aggregate shape on skid resistance of compacted hot mix asphalt (HMA). Second International Conference on Computer and Network Technology, p. 421-425, 2010.

SOUSA, J.B.; PAIS, J.C.; PRATES, M.; BARROS, R.; LANGLOIS, P.; LECLERC, A.M. Effect of aggregate gradation on fatigue life of asphalt concrete mixes. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No. 98-0897, 1998.

SUGANDH, R.; ZEA, M.; TANDON, V.; SMIT, A.; PROZZI, J. Performance evaluation of HMA consisting of modified asphalt binder. Research Report 0-4824-2, Project Number 0-4824, 2007.

SULLIVAN, B.W. Development of a fundamental skid resistance asphalt mix design procedure. International Surface Friction Conference: roads and runways: improving safety through assessment and design, Christchurch, New Zealand, 2005.

VASCONCELOS, K.L.; BERNUCCI, L.L.B.; MOURA, E.; SANBONSUGE, K.; CHAVES, J.M. Caracterização mecânica de misturas asfálticas contínuas e descontínuas com diferentes ligantes asfálticos. 70. Congresso Brasileiros de Rodovias e Concessões, 2011.

VIEIRA, T. Asphaltic pavement surface analysis and its effects on the tyre-pavement friction performance. Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 2014.

WITCZAK, M.W.; KALOUSH, K.E.; PELLINEN, T.K.; EL-BASYOUNY, M. VON QUINTUS, H.L. **NCHRP Report 465: Simple performance test for Superpave mix design**. Transportation Research Board, National Research Council, Washington, DC, 2002.

ZEIADA, W.A.; KALOUSH, K.E.; UNDERWOOD, B.S.; MAMLOUK, M.S. Effect of air voids and asphalt content on fatigue damage using the viscoelastic continuum damage analysis. Airfield and Highway Pavement 2013: Sustainable and Efficient Pavements - Proceedings of the 2013 Airfield and Highway Pavement Conference, p. 1122-1133, 2013.

# ANEXOS

# **RESUMO DE ATIVIDADES**

Devido ao presente relatório de pesquisa ser o **RELATÓRIO FINAL**, não é apresentado o Resumo de Atividades.

## **RELATÓRIO DE EXECUÇÃO DE TESTES E ENSAIOS**

O relatório de execução de testes e ensaios é dividido em três grupos: <u>controle tecnológico</u> da construção do trecho experimental; <u>monitoramento de campo</u> com levantamentos periódicos de defeitos; e <u>ensaios laboratoriais</u> de previsão de comportamento mecânico e superficial das misturas asfálticas. São apresentadas as normas utilizadas para a realização de cada teste, bem como um resumo do procedimento adotado. Além disso, são anexadas as fichas de cada ensaio realizado, para fins de um melhor detalhamento dos resultados obtidos durante a pesquisa.

#### **CONTROLE TECNOLÓGICO**

#### Teor de ligante asfáltico

**Norma do ensaio:** ASTM D 6307 (2019): Standard Test Method for Asphalt Content of Asphalt Mixture by Ignition Method

**Resumo do ensaio:** Este método de ensaio compreende a determinação do teor de asfalto de uma mistura asfáltica ao remover o cimento asfáltico por meio de forno de ignição. O ligante asfáltico da mistura asfáltica é inflamado por meio do uso de equipamento de forno do tipo mufla, próprio para este método. O teor de ligante asfáltico é calculado pela diferença entre a massa do agregado residual e da massa inicial da mistura asfáltica. O teor de ligante asfáltico é expresso como porcentagem, em massa, da mistura asfáltica sem ligante.

Anexo: ANEXO 1.1\_CT

#### Granulometria

Norma do ensaio: ARTERIS T-27 (2014): Análise Granulométrica de Agregados Finos e Graúdos

**Resumo do ensaio:** Uma amostra de agregado seco de massa conhecida é separada através de uma série de peneiras de tamanhos progressivamente menores para determinação da distribuição por tamanhos das partículas.

Anexo: ANEXO 1.2\_CT

#### Densidade específica aparente da mistura compactada

Norma do ensaio: ARTERIS T-166 (2013): Massa específica aparente de misturas asfálticas compactadas usando amostras saturadas – superfície seca

**Resumo do ensaio:** Um corpo-de-prova de mistura asfáltica, seja produzido em laboratório ou extraído de pista, é pesado para obtenção de sua densidade aparente, obtida por meio da relação

de sua massa com o seu volume. O corpo-de-prova é pesado em balança hidrostática e, por meio de relações matemáticas que levam em consideração a densidade da água, é obtido o seu volume. **Anexo:** ANEXO 1.3\_CT

#### Massa específica máxima medida

**Norma do ensaio:** ARTERIS T-209 (2010): Massa Específica Teórica Máxima e Densidade de Misturas Asfálticas para Pavimentação

**Resumo do ensaio:** Uma amostra, já pesada, da MAQ na condição solta e seca, é colocada num Frasco de peso conhecido. Uma quantidade suficiente de água a  $25 \pm 05^{\circ}$ C é adicionada até cobrir completamente a amostra. O Vácuo é aplicado por um período de  $15 \pm 2$  minutos para gradualmente reduzir a uma pressão residual no frasco para  $3,7 \pm 0,3$  kPa. Ao final deste período, o vácuo é reduzido gradualmente. O volume da amostra da MAQ é obtido seja pela imersão do Frasco com a amostra totalmente em água e determinando o peso (seção 13.1) ou enchendo completamente o Frasco com água e pesando ao ar (seção 13.2). Na hora da pesagem se mede a temperatura assim como o peso da amostra. Das medições de massa e volume, a Massa Específica ou Densidade a  $25 \,^{\circ}$ C é calculada. Se a temperatura for diferente de  $25 \,^{\circ}$ C, é necessário corrigir de maneira apropriada.

Anexo: ANEXO 1.4 CT

#### Volume de vazios

Norma do ensaio: ARTERIS T-269 (2014): Porcentagem de Vazios de Misturas Asfálticas Densas e Abertas Compactadas

**Resumo do ensaio:** Um corpo-de-prova de mistura asfáltica, seja produzido em laboratório ou extraído de pista, é pesado em diferentes condições (ao ar, imerso em água e em condição de superfície saturada seca) para obtenção de seu volume de vazios, por meio de relações matemáticas entre massa, volume e densidade, incluindo a consideração da densidade da água à temperatura na qual ela se encontra.

Anexo: ANEXO 1.5\_CT

#### **MONITORAMENTO DE CAMPO**

#### Afundamento em trilha de roda

**Norma do ensaio:** DNIT 007 (2003): Levantamento para avaliação da condição de superfície de subtrecho homogêneo de rodovias de pavimentos flexíveis e semi-rígidos para gerência de pavimentos e estudos e projetos – Procedimento

**Resumo do ensaio:** As flechas de fundamento em trilha de roda em pista são medidas em milímetros, na seção transversal média de cada superfície de avaliação, demarcada previamente na pista. Para esse levantamento é utilizada uma treliça de padrão normatizado. As medições são executadas nas trilhas de roda interna (TRI) e externa (TRE), deslocando-se a treliça transversalmente dentro da trilha até a obtenção da leitura máxima. Caso o ponto selecionado apresente remendo ou panela que inviabilize a medida da flecha, a treliça deve ser deslocada, longitudinalmente, o estritamente necessário para executar a operação.

#### Anexo:

ANEXO 2.1.1\_MC (4 meses) ANEXO 2.1.2 MC (12 meses)

#### Área trincada

**Norma do ensaio:** DNIT 007 (2003): Levantamento para avaliação da condição de superfície de subtrecho homogêneo de rodovias de pavimentos flexíveis e semi-rígidos para gerência de pavimentos e estudos e projetos – Procedimento

**Resumo do ensaio:** O ensaio para obtenção da área trincada é realizado por meio da medição do comprimento e da largura das trincas observadas em pista, para o caso de trincas interligadas em bloco. Para as trincas isoladas, considera-se o seu comprimento e adota-se 15cm como largura. A área trincada é dada em porcentagem, calculada em relação à área total do segmento levantado.

#### Anexo:

ANEXO 2.2.1\_MC (4 meses) ANEXO 2.2.2\_MC (12 meses)

#### Textura superficial – macrotextura

**Norma do ensaio:** ASTM E 965 (2015): Standard Test Method for Measuring Pavement Macrotexture Depth Using a Volumetric Technique

**Resumo do ensaio:** O procedimento de ensaio envolve espalhar um volume conhecido de material em uma superfície limpa e seca de pavimento, medindo a área coberta, e subsequentemente calculando a altura média entre o fundo dos vazios na superfície do pavimento e os topos da superfície das partículas de agregado. A medição da altura de textura superficial do pavimento reflete as características de macrotextura do pavimento.

#### Anexo:

ANEXO 2.3.1\_MC (0 meses) ANEXO 2.3.2\_MC (4 meses) ANEXO 2.3.4 MC (12 meses)

#### Textura superficial – microtextura

**Norma do ensaio:** ASTM E 303 (2018): Standard Test Method for Measuring Surface Frictional Properties Using the British Pendulum Tester

**Resumo do ensaio:** O procedimento de ensaio consiste no uso de um equipamento do tipo pêndulo com uma sapata de borracha padronizada para determinar as propriedades de atrito da superfície testada. A superfície deve ser limpa e molhada antes do ensaio. A sapata do pêndulo é posicionada próxima à superfície do pavimento antes do início do ensaio. O pêndulo é então levantado a uma posição travada e, em seguida, é liberado, fazendo com que a sapata entre em contato com a superfície testada. Um ponteiro de arraste indica o número de pêndulo britânico (BPN). Quanto maior o atrito entre a sapata e a superfície do pavimento, menor é o deslocamento do ponteiro e maior é o valor do BPN.

#### Anexo:

ANEXO 2.3.1\_MC (0 meses) ANEXO 2.3.3\_MC (4 meses) ANEXO 2.3.5\_MC (12 meses)

#### Irregularidade longitudinal

**Norma do ensaio:** ASTM E 1926 (2015): Standard Practice for Computing International Roughness Index of Roads from Longitudinal Profile Measurements

#### Resumo do ensaio:

#### Anexo:

ANEXO 2.4.1\_MC (0 meses) ANEXO 2.4.2 MC (4 meses)

#### **ENSAIOS LABORATORIAIS**

#### Rigidez

**Norma do ensaio:** AASHTO T 342 (2011): Standard Method of Test for Determining Dynamic Modulus of Hot Mix Asphalt (HMA)

**Resumo do ensaio:** O ensaio consiste na aplicação de uma tensão controlada, garantindo carregamentos que resultem em deformações entre 50 e 150 microstrains, com o objetivo de assegurar a obtenção de propriedades na zona de viscoelasticidade linear do material. Os carregamentos foram aplicados em diferentes frequências (25, 10, 5, 1, 0.5 e 0.1Hz) e temperaturas (4.4, 21.1, 37.8 e 54°C). **Anexo:** 

ANEXO 3.1.1\_EL ANEXO 3.1.2\_EL ANEXO 3.1.3 EL

#### Deformação permanente

**Norma do ensaio:** EN 12697-22 (2008): Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 22: Wheel tracking

**Resumo do ensaio:** O procedimento consiste na passagem de um pneu liso, com pressão de inflação de 0,6MPa, e carga de ensaio de 5kN, sobre a amostra condicionada a 60°C, na frequência de 1Hz, com medições em 100, 300, 1.000, 3.000, 10.000 e 30.000 ciclos acumulados.

#### Anexo:

ANEXO 3.2.1\_EL ANEXO 3.2.2\_EL

#### Fadiga

**Norma do ensaio:** ASTM D 7460 (2010): Standard Test Method for Determining Fatigue Failure of Compacted Asphalt Concrete Subjected to Repeated Flexural Bending

**Resumo do ensaio:** O método do ensaio de flexão em vigota de quatro pontos é conduzido em um corpo-de-prova compactado em um formato de viga, com o objetivo de avaliar as propriedades de fadiga de uma mistura de concreto asfáltico. Um deslocamento do tipo haversine é aplicado no terço central da amostra, enquanto que a amostra é apoiada em suas extremidades. Esse procedimento produz um momento fletor constante no terço central da amostra. O nível da deformação controlada deformada é previamente calculado e usado como dado de entrada para controle do deslocamento durante o ensaio.

#### Anexo:

ANEXO 3.3.1\_EL ANEXO 3.2.2 EL

#### Textura superficial – macrotextura

**Norma do ensaio:** ASTM E 965 (2015): Standard Test Method for Measuring Pavement Macrotexture Depth Using a Volumetric Technique

**Resumo do ensaio:** O procedimento de ensaio envolve espalhar um volume conhecido de material em uma superfície limpa e seca de pavimento, medindo a área coberta, e subsequentemente calculando a altura média entre o fundo dos vazios na superfície do pavimento e os topos da superfície das partículas de agregado. A medição da altura de textura superfícial do pavimento reflete as características de macrotextura do pavimento.

#### Textura superficial – microtextura

**Norma do ensaio:** ASTM E 303 (2018): Standard Test Method for Measuring Surface Frictional Properties Using the British Pendulum Tester

**Resumo do ensaio:** O procedimento de ensaio consiste no uso de um equipamento do tipo pêndulo com uma sapata de borracha padronizada para determinar as propriedades de atrito da superfície testada. A superfície deve ser limpa e molhada antes do ensaio. A sapata do pêndulo é posicionada próxima à superfície do pavimento antes do início do ensaio. O pêndulo é então levantado a uma posição travada e, em seguida, é liberado, fazendo com que a sapata entre em contato com a superfície testada. Um ponteiro de arraste indica o número de pêndulo britânico (BPN). Quanto maior o atrito entre a sapata e a superfície do pavimento, menor é o deslocamento do ponteiro e maior é o valor do BPN.

Anexo:

ANEXO 3.4.1\_EL ANEXO 3.4.2\_EL

# LISTA DE PRESENÇA NAS ATIVIDADES DE CAPACITAÇÃO DE PESSOAS

Não houve atividades de capacitação de pessoas durante o período da presente pesquisa.

# RELATÓRIO COM A DESCRIÇÃO DETALHADA DAS ATIVIDADES DESENVOLVIDAS PELO BOLSISTA DE MESTRADO OU DOUTORADO

### Relatório de iniciação científica

Bolsista: Rodrigo Resende de Vasconcelos CPF: 022.063.285-50 Telefone: (11) 3091-6090 E-mail: rodrigo.vasconcelos@usp.br Período da bolsa: 01/03/19 – 31/08/19

#### **INTRODUÇÃO**

O trabalho desenvolvido no Laboratório de Tecnologia de Pavimentação da USP consistiu em uma pesquisa chamada "Caracterização da textura superficial e do comportamento mecânico de misturas asfálticas com diferentes granulometrias e propriedades volumétricas". A partir de ligante asfáltico recebido de usina e agregado proveniente de pedreira, ambos devidamente caracterizados, corpos de prova de vários tipos revestimentos asfálticos - Concreto Betuminoso Usinado a Quente (CBUQ), Gap Graded e Camada Porosa de Atrito (CPA) - foram usinados, moldados e compactados em laboratório (com e sem vibração), e em seguida submetidos a diferentes tipos de ensaios (Ensaio PTA, Ensaio de Pêndulo Britânico e Ensaio de Mancha de Areia) para caracterizar sua textura superficial (macro e microtextura). Os resultados desses ensaios foram analisados, a fim de se verificar se a partir deles é possível diferenciar os diferentes tipos de revestimento. A partir dos resultados obtidos, foi possível detectar algumas divergências no ensaio PTA, realizando adaptações de modo a obter resultados mais satisfatórios.

#### ATIVIDADES REALIZADAS

#### A pesquisa

As atividades realizadas no laboratório fazem parte da pesquisa "Restaurações da camada de rolamento de pavimentos asfálticos visando maior durabilidade e atendimento da textura superficial". Esta foi realizada no âmbito do Projeto "Restaurações da Camada de Rolamento de Pavimentos Asfálticos – Visando Durabilidade e Atendimento da Textura Superficial", fruto de uma parceria entre o LTP e a empresa Arteris S.A., companhia do setor de concessões de rodovias que desde 2008 é responsável pela administração dos 402,6 quilômetros de extensão da Rodovia Régis Bittencourt (BR-116), que liga as cidades de São Paulo (SP) e Curitiba (PR). O objetivo

principal da pesquisa foi analisar soluções distintas de camada de rolamento para a restauração de pavimentos asfálticos, em termos de durabilidade e textura superficial.

#### Moldagem dos corpos de prova

A primeira atividade realizada no laboratório foi o acompanhamento da moldagem e compactação dos corpos de prova que seriam usados nos ensaios. Foram moldadas 20 placas de revestimento asfáltico, numeradas de 1 a 18, mais as placas 4B e 7B. As placas 1 a 6 e 4B são de Camada Porosa de Atrito (CPA), as placas 7 a 12 e 7B são de revestimento asfáltico *Gap Graded*, e, por fim, as placas 13 a 18 são de Concreto Betuminoso Usinado a Quente (CBUQ). Além da diferenciação dos tipos de revestimento, outro objetivo dos experimentos era avaliar a influência da vibração na textura superficial do pavimento. Assim, as placas 1, 2, 4B, 7B, 10, 11, 13, 14, 16 foram feitas com vibração, enquanto as placas 3, 5, 6, 8, 9, 12, 15, 17 e 18 foram produzidas sem vibração. Devido a um erro na compactação, as placas 4 e 7 foram desconsideradas na avaliação da vibração.

A vibração utilizada durante a produção das placas (**Figura 84**) consistiu no seguinte processo: primeiro aplicou-se vibração por um minuto a 35 Hz com placa metálica; em seguida fez-se a précompactação (**Figura 85**); realizou-se nova compactação; depois vibração por meio minuto a 35Hz com placa metálica. É importante observar que a pré-compactação com pneu teve que ser realizada pois a mistura estava afundando muito na passagem de pneu com pressão de compactação.



Figura 84. Compactação de placa



Figura 85. Pré-compactação com pneu

Os ensaios feitos em seguida estão relacionados com a textura do pavimento: ensaio PTA, Pêndulo Britânico e Mancha de Areia.

#### Ensaio de pêndulo britânico

A microtextura do pavimento está relacionada com a própria superfície do agregado mineral, a qual pode ser áspera ou polida e cujos comprimentos de onda variam entre 0 a 0,5 mm e amplitude de 0 a 0,2 mm. Esta propriedade depende das propriedades mineralógicas dos agregados e é de fundamental importância para romper o filme de água quando do contato pneu/pavimento. A maneira mais comum de se medir microtextura é através do ensaio de Pêndulo Britânico, normalizado conforme a ASTM D303-93 (ver Figura 86).

O procedimento de ensaio consiste em posicionar o corpo de prova umedecido sob o equipamento e determinar o comprimento de deslizamento da borracha sobre ele. As medições começam quando o braço do pêndulo é liberado a partir de uma posição horizontal, atingindo a superfície do corpo de prova com uma velocidade constante. A distância percorrida por ele após a colisão com o corpo de prova é determinada pela resistência de atrito na superfície do corpo de prova. Os valores de resistência ao escorregamento (SRV) são lidos diretamente a partir da escala graduada.



Figura 86. Realização do ensaio de Pêndulo Britânico

#### Ensaio de mancha de areia

A macrotextura do pavimento está relacionada com a aspereza superficial do causada pelas protuberâncias devido ao agregado, com comprimento de onda de 0,5 a 50mm e amplitude de 0,2 a 10mm. Ela influencia no atrito em altas velocidades; a capacidade do pavimento drenar a água superficial (evitando o fenômeno da hidroplanagem); a formação de spray; a formação do espelho noturno; o aumento no consumo de combustível; o desgaste dos pneumáticos e excessivos níveis de ruído. A distribuição granulométrica, as características dos agregados (forma, tamanho, etc.) a dosagem da mistura e o processo construtivo influenciam muito na macrotextura final do pavimento.

Uma das formas de se medir a macrotextura é por meio do ensaio de Mancha de Areia normalizado pela ASTM D965-96 (ver Figura 87). O processo consiste em espalhar, com movimentos circulares de um dispositivo apropriado (espalhador de madeira com revestimento de borracha) na superfície do pavimento, um volume conhecido de areia ou microesferas de vidro (25000 mm<sup>3</sup>  $\pm$  150mm<sup>3</sup>). Mede-se o tamanho da mancha em 4 direções, e então, com a média, calcula-se a altura da macrotextura, ou altura de areia, pela **Equação 1**.

$$h_s = \frac{4V}{d_m^2 \times \pi}$$
(Eq. 1)

Onde:  $h_s$  = altura média de areia; V = volume;  $d_m$  = média das medidas da mancha na superfície do pavimento.



Figura 87. Realização do ensaio de Mancha de Areia

É importante ressaltar que no momento do ensaio o pavimento deve estar perfeitamente limpo e seco e as microesferas devem ter um grau de esfericidade superior a 90% e tamanho padronizado (90% passante na peneira nº 60 e retida na nº 80).

#### **Ensaio PTA**

O ensaio PTA consiste em uma forma indireta de se avaliar a textura do pavimento, por meio de um equipamento desenvolvido no Laboratório de Tecnologia de Pavimentação da EPUSP entre 2010 e 2011, e patenteado sob o número de registro BR102013013198-9. O método de cálculo e o equipamento foram desenvolvidos pela Profa. Dra. Liedi L. B. Bernucci, MSc. Sérgio C. Callai, MSc. Tiago Vieira e Renato Peixoto.

O equipamento utiliza-se de um conceito já difundido, denominado estereoscopia. O dispositivo é composto por uma caixa preta de material anti-reflexivo e quatro lâmpadas posicionadas internamente com defasagem angular de 90° (ver Figura 88 e Figura 89). O corpo de prova é colocado no interior da caixa, que em seguida é tampada, apresentando um orifício apenas para a ocular da câmera responsável pela captura da intensidade das imagens. A amostra é iluminada por quatro lâmpadas individualmente e as quatro imagens capturadas são utilizadas para gerar o modelo tridimensional da textura em *software*, que também fornece valores de curtose e assimetria para a superfície analisada.



Figura 88. Caixa para ensaio PTA com lâmpadas posicionadas



Figura 89. Realização do ensaio PTA

# **PROPOSTAS DE MELHORIAS**

Por ser uma tecnologia nova, o Ensaio PTA ainda está passando por vários testes e melhorias. As primeiras medições realizadas indicavam resultados muito discrepantes para medições realizadas sob as mesmas condições (mesmo corpo de prova, mesma posição da caixa, etc.). Isso indicava que o requisito de repetibilidade do experimento estava comprometida.

Uma sugestão feita foi que se fixassem as lâmpadas na caixa de maneira permanente, pois inicialmente elas eram fixadas com fita adesiva a cada dia de trabalho, e à medida que os experimentos eram realizados ao longo do dia, elas tendiam a se deslocar em relação à sua posição original, o que prejudicava as medições. Foi feita então a fixação de maneira definitiva com o uso de silicone, conforme pode ser visto na Figura 90.



Figura 90. Detalhe de uma das lâmpadas fixada à caixa com silicone

Outra melhoria proposta em relação ao experimento foi que a câmera pudesse ser fixada na caixa, pois assim como as lâmpadas, ela era posicionada com o uso de fita adesiva. Ao clicar para fazer a captura das imagens, ela se deslocava em relação à posição original, o que alterava seu foco e produzia imagens muito diferentes, mesmo que a caixa não tivesse se movimentado. Atendendo a essa sugestão, o laboratório produziu um suporte para fixar a câmera à caixa, conforme pode ser visto na Figura 91.



Figura 91. Detalhe da tampa da caixa com o suporte para a câmera

Essas mudanças melhoraram significativamente os resultados, como poderá ser visto no próximo item.

#### RESULTADOS

Os resultados para o ensaio de Mancha de Areia podem ser visualizados nas Tabelas 1 e 2, disponíveis na seção de Anexos. Ela indica que o uso da compactação tende a diminuir o fator  $h_s$ , ou seja, a profundidade da macrotextura do pavimento. A norma recomenda que o pavimento apresente textura superficial entre 0,6 e 1,2 milímetros (textura superficial média a grosseira). Essa textura foi obtida para os revestimentos com GAP e CBUQ.

Os resultados obtidos para o ensaio de Pêndulo Britânico podem ser visualizados na Tabela 3, disponível nos Anexos. Como já foi dito, a microtextura está relacionada com a textura superficial do agregado (no experimento realizado, já coberto com o ligante). Uma vez que no estudo feito nem o agregado nem o ligante foram alterados, naturalmente os resultados para o ensaio de pêndulo foram mais ou menos os mesmos para todas as placas, sem grandes diferenças, como era esperado.

A PTA foi o ensaio que apresentou os resultados mais interessantes. Devido à grande quantidade de medições, não serão apresentadas todas neste relatório. No entanto, os dois gráfico da Figura 92 abaixo exemplifica a diferença de dispersão antes das mudanças propostas no item 6. A análise completa dos dados ainda será realizada, mas essa melhora nos resultados é bastante animadora.



Figura 92. Resultado de Assimetria para a placa 5 fornecido pela PTA. Note-se a diminuição da dispersão das medidas após a fixação de lâmpadas e câmera

Tabela 1. Medições para o ensaio de Mancha de Areia

Data	Placa	Mistura		Compactação	Hs
03/08/2019	1	M028	CPA	Vibrada	1,56
03/08/2019	2	M028	CPA	Vibrada	1,42
12/10/2018	3	M028	CPA	Normal	2,79
03/08/2019	4b	M028	CPA	Vibrada***	1,19
03/07/2019	5	M028	CPA	Normal	1,35
03/08/2019	6	M028	CPA	Normal	1,42
03/11/2019	7b	M023	GAP	Vibrada	0,88
12/11/2018	8	M023	GAP	Normal	0,99
12/11/2018	9	M023	GAP	Normal	1,08
03/11/2019	10	M023	GAP	Vibrada	0,88
03/08/2019	11	M023	GAP	Vibrada	1,03
03/08/2019	12	M023	GAP	Normal	1,19
03/11/2019	13	M025	CBUQ	Vibrada	0,75
03/11/2019	14	M025	CBUQ	Vibrada	0,75
03/11/2019	15	M025	CBUQ	Normal	0,78
03/11/2019	16	M025	CBUQ	Vibrada	0,63
03/07/2019	17	M025	CBUQ	Normal	1,01
03/07/2019	18	M025	CBUQ	Normal	0,97
03/07/2019	4	M028	CPA	Vibrada**	1,88
12/11/2018	7	M023	GAP	Vibrada*	0,88

	Média	Desvio H <sub>s</sub>			
	Hs				
CPA Vibrado	1,39	0,19			
CPA Padrão	1,85	0,81			
GAP Vibrado	0,93	0,09			
GAP Padrão	1,09	0,10			
CBUQ Vibrado	0,71	0,07			
CBUQ Padrão	0,92	0,12			
CPA Vibrado**	1,88	-			
GAP Vibrado*	0,88	-			
*Pré-compactação; compactação; vibração direto na placa;					
**Vibração com placa metalica; pré-compactação; compactação; vibração com placa metalica;					
***Pré-compactação; vibração com placa metalica; compactação; vibração sem placa					
metálica (Vibradas sem asterisco também seguem esse processo)					

Tabela 3. Resultado para os ensaios de Pêndulo Britânico

		Placa	Resultado	Média	
		CP3	63,2		
	Normal	CP5	75,6	68,93	
		CP6	68		
CPA	Vibrado	CP1	65	67,6	
		CP2	75,4		
		CP4B	68,8		
		CP4	61		
		CP8	80		
	Normal	CP9	82	76,0	
		CP12	66		
GAP	Vibrado	CP7B	69,4	71,3	
		CP10	75		
		CP11	66		
		CP7	74,8		
		CP15	72		
	Normal	CP17	68,2	71,5	
CBUO		CP18	74,4		
CDOQ	Vibrado	CP13	71	75,9	
		CP14	76,8		
		CP16	80		

# REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- KUCHIISHI, A. K., CALLAI, S. C., VIEIRA, T., & BERNUCCI, L. B. (2014). Estudo da macrotextura do pavimento a partir de ensaios de mancha de areia e drenabilidade em conjunto com análise da superfície por estereoscopia. São Paulo-SP: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
- SANTOS, R. T., SPECHT, L. P., HIRSCH, F., & ROZEK, T. (Julho de 2007). Avaliação da macrotextura de pavimentos através do ensaio de Mancha de Areia. *Teoria e Prática na Engenharia Civil*, 30-38.
- VALDO, L., & CASTRO, N. F. (10 a 13 de Abril de 2016). Estimativa da incerteza de medição do método do Pêndulo Britânico para determinação da resistência ao escorregamento de rochas ornamentais. João Pessoa-PB: IX Simpósio de Rochas Ornamentais do Nordeste.

#### Relatório de mestrado

Título da dissertação: Análise de durabilidade e textura superficial em restaurações de camada de rolamento de pavimentos asfálticos Instituição: Universidade de São Paulo Bolsista: Marina Frederich de Oliveira CPF: 027.633.870-71 Telefone: (11) 3091-6090 E-mail: marinafrederich@usp.br Período da bolsa: 01/03/19 – 31/08/19

#### ATIVIDADES REALIZADAS

A bolsista, com carga horária de 40 horas semanais, desenvolveu as atividades exclusivamente relacionadas ao projeto. Inicialmente, realizou acompanhamento do processo de dosagem, realizado no Centro de Desenvolvimento Tecnológico da ARTERIS em abril de 2018 e acompanhamento da execução do trecho experimental localizado em Cajati/SP em junho de 2018. Durante execução, houve coleta de materiais (mistura asfáltica, agregados, ligante asfáltico, cal), utilizados para caracterização tecnológica e para ensaios laboratoriais. A caracterização tecnológica contou com determinação do teor de ligante asfáltico pelo método da ignição, determinação da massa específica máxima medida por meio do método à vácuo, determinação da distribuição granulométrica da mistura por meio de peneiramento do material após ser submetido à ignição, moldagem de corpos de prova do tipo Marshall para posterior pesagem hidrostática e determinação de densidade da massa compactada, moldagem de placas por meio de mesa compactadora francesa, para análise de textura superficial com ensaios de pêndulo britânico, mancha de areia e pavement texture analyzer, antes e após submeter as amostras em simulador de tráfego do tipo francês, como método de análise da mudança da textura superficial de acordo com

Após a construção, foram realizados ensaios em campo dando início às campanhas de ensaios para monitoramento do trecho, localizado em Cajati/SP, contando com ensaios de mancha de areia, pêndulo britânico, Pavement Texture Analyzer, levantamento de trincas, avaliação de afundamento de trilha de roda com treliça, medição da irregularidade longitudinal de pavimento com equipamento Merlin. A aluna bolsista participou do monitoramento do trecho em junho (pósobra) e outubro de 2018 (4 meses de obra).

Mais um monitoramento foi realizado em dezembro, porém, com levantamentos contratados, prestados pela empresa Road Runner. A referida empresa realizou ensaios para fornecimento de irregularidade longitudinal com perfilômetro a laser, atrito com grip tester, deflexões com falling weight deflectometer e macrotextura com PavScan. Em junho de 2019 outro monitoramento foi realizado pela empresa Imperpav, com realização dos ensaios de mancha de areia, pêndulo britânico, levantamento visual contínuo de área trincada, afundamento de trilha de roda e pavement texture analyzer. Os dados obtidos pelos ensaios realizados pelas empresas foram analisados pela aluna, com intenção de compor o relatório e a dissertação, no entanto, os ensaio da empresa Road Runner, por se tratar de um diferente método de medição não pôde ser correlacionado adequadamente.

Em laboratório, além dos ensaios realizados com massa asfáltica extraída da obra, também foram utilizados corpos de prova extraídos do trecho experimental, totalizando 40 corpos de prova, sendo 5 referentes a cada um dos 8 segmentos de pavimento em análise na pesquisa. Os respectivos corpos de prova foram serrados para nivelação e para garantir a altura correta, medidos com paquímetro, pesados ao ar, imersos e com superfície seca, para posterior cálculo do volume de vazios, e por fim, foi realizado o ensaio de Módulo de Resiliência em cada um deles, por meio de prensa hidráulica do tipo Material Testing System (MTS). As amostras extraídas de campo foram enviadas para realização de tomografia para caracterização da estrutura interna.

O processo de ensaios laboratoriais com amostras feitas em laboratório também foi realizado pela aluna. Foram moldados 16 corpos de prova em Compactador Giratório Superpave, em parceria com o Centro de Desenvolvimento Tecnológico da ARTERIS, referentes às misturas asfálticas em estudo. Realizou-se serragem dos corpos de prova para garantir a altura correta de ensaio, medição das dimensões com paquímetro, pesagem hidrostática para determinação de volume de vazios, e, foi realizado o ensaio de Módulo Dinâmico nos referidos corpos de prova, como caracterização da rigidez das misturas, por meio de prensa hidráulica do tipo Material Testing System (MTS).

Além destes, foram produzidas 24 placas por meio de mesa compactadora do tipo francesa, para caracterização da textura superficial com uso de ensaios de mancha de areia, pêndulo britânico, e pavement texture analyzer. As amostras diferem pelo tipo de mistura (CA, GAP, SEMI, CPA) e tipo de compactação (com e sem vibração), e foram consideradas 3 amostras por condição. A

produção de placas conta com o processo de secagem do material, separação da granulometria, usinagem da mistura e compactação.

A textura superficial também foi avaliada concomitantemente ao ensaio de deformação permanente por meio de simulador de tráfego do tipo LCPC, com realização de paradas a 3.000, 10.000 e 30.000 ciclos. Os ensaios foram realizados pela aluna bolsista em conjunto com o aluno de iniciação científica.

Ainda, a produção de amostras para o ensaio de fadiga em vigota 4 pontos foi também de responsabilidade da aluna. Foram confeccionadas cerca de 20 placas na mesa compactadora, para obtenção de 2 vigotas por placa, enviadas ao Centro de desenvolvimento tecnológico para realização do ensaio.

Todos estes ensaios fazem parte do projeto e serviram como base de dados do estudo, contribuindo diretamente para os resultados e conclusões do projeto.

# PRODUÇÃO ACADÊMICA

- 32° ANPET Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, relatório de dissertação intitulado "Análise de Durabilidade e Textura Superficial em Restaurações de camada de rolamento de pavimentos asfálticos".
- 26º SIICUSP Simpósio Internacional de Iniciação Científica e Tecnológica da Universidade de São Paulo, trabalho intitulado "Restaurações da camada de rolamento de pavimentos asfálticos visando maior segurança e durabilidade".

# **RELATÓRIO RELATIVO À PARTICIPAÇÃO EM EVENTOS**

32º Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes
Local do congresso: Gramado/RS
Participante: Marina Frederich de Oliveira
Data: 04/11/18 – 07/11/18

### PROGRAMAÇÃO

Para programação detalhada, acessar: http://www.anpet.org.br/32anpet/images/programaçao/Prog\_XXXII\_ANPET\_01\_11\_2018.pdf

#### TEMAS

- Infraestrutura
- Logística
- Gestão de Transportes
- Tráfego Urbano e Rodoviário
- Modelos e Técnicas de Planejamento de Transportes
- Aspectos Econômicos Sociais Políticos e Ambientais do Transporte
- Planejamento Territorial do Transporte

#### **EXPOSITORES**

A lista completa dos expositores do congresso é muito extensa, por isso são apresentados abaixo apenas os expositores da mesma sessão na qual foi apresentado o trabalho relacionado com a presente pesquisa.

#### Sessão Técnica: Dimensionamento, Avaliação e Gestão de Pavimentos II

**Título do trabalho:** Avaliação da influência da textura do pavimento no desempenho da retrorrefletividade em demarcações várias: estudo de caso em um trecho monitorado em Santa Maria/RS.

Autores: Marcos Rodrigues da Silva Felipe Peranzoni Parcianello Antônio Daniel Boff Vieira Artur Cortes da Rosa **Título do trabalho:** Avaliação do desempenho de pavimentos com revestimento em camada singular e em camadas integradas.

Autores:Glicério TrichêsLídia Carolina da LuzAline Selau dos SantosJoão Victor Staub de MeloMatheus Felipe MarconGabriela Ceccon CarlessoLiseane Padilha Thives da Luz Fontes

**Título do trabalho:** Análise de durabilidade e textura superficial em restaurações de camada de rolamento de pavimentos asfálticos.

Autores: Marina Frederich de Oliveira Iuri Sidney Bessa Kamilla Vasconcelos Savasini Liedi Bariani Bernucci

**Título do trabalho:** Aperfeiçoamento do aplicativo para smartphones – SmartIRI3 para medição da irregularidade longitudinal dos pavimentos.

Autores:Fabricio Helder Mareco MagalhãesErnesto Ferreira Nobre Júnior

A lista completa dos expositores deve ser acessada por meio do link: http://www.anpet.org.br/32anpet/images/programaçao/areas-tematicas/19-10-2018-SESSOES-TECNICAS.pdf

#### **INFORMAÇÕES RELEVANTES**

A aluna participou do evento 32º Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes (ANPET), nos dias 04 a 07 de novembro de 2018, em Gramado, Rio Grande do Sul. O evento contou com realização de palestras, apresentação de trabalhos científicos e mini-cursos, presenciados pela aluna, relacionados à área de pavimentação, ferrovias e aeroportos.

O congresso contou com a participação de alunos (pós-graduação e graduação), professores, engenheiros, e outros profissionais da área, de modo a proporcionar uma boa relação da aluna com

outras instituições. A troca de experiências e discussões de pesquisas realizadas em outros ambientes é sempre válida.

A aluna apresentou o relatório de dissertação com o título de "Análise de durabilidade e textura superficial em restaurações de camada de rolamento de pavimentos asfálticos". Após apresentação houve questionamentos levantados pelo público, e discussões levantadas sobre o tema, com enriquecimento à sessão técnica.

A experiência de participar do evento, ainda com trabalho apresentado, foi muito gratificante e enriquecedora para a pesquisa. As contribuições dos presentes foram muito pertinentes. Além do mais, estar no meio cheio de interessados na mesma área traz motivação para melhora dos estudos.

# DISCRIMINAÇÃO DE MÁQUINAS, EQUIPAMENTOS, FERRAMENTAS, SOFTWARES, SISTEMAS, OU OUTROS ITENS DE VALORES RELEVANTES

## **CADASTRO DE BENS ADQUIRIDOS**

# CÓPIA DA SOLICITAÇÃO DA ATUALIZAÇÃO DO TERMO DE ARROLAMENTO DE BENS

Os documentos referentes a compra de equipamentos estão em anexo no arquivo EQUIPAMENTOS.rar.

# PEDIDO DE DOAÇÃO DE BENS ADQUIRIDOS

Não há pedidos de doação de bens adquiridos nesta pesquisa.

# PRODUÇÃO ACADÊMICA

#### **RELATÓRIOS DE DISSERTAÇÃO**

# Análise de durabilidade e textura superficial em restaurações de camada de rolamento de pavimentos asfálticos

Evento: 32º Congresso de Pesquisa e Ensino em Transporte

Autor(es): OLIVEIRA, M. F.; BESSA, I. S.; VASCONCELOS, K. L.; BERNUCCI, L. L. B.

#### Data da publicação: 2018

Anexo: 10.1.1. Oliveira et al. (2018)

Resumo: A concepção de uma estrutura de pavimento deve considerar que esta seja adequada para suportar os esforços impostos pelo tráfego, especialmente, a camada de revestimento, que recebe diretamente essas ações. Os principais defeitos observados nas rodovias brasileiras são: o trincamento por fadiga e a deformação permanente. Quando ocorre o rompimento da estrutura, é necessário realizar restauração do pavimento para que volte a apresentar segurança e conforto na trafegabilidade aos usuários. Ainda, um fator diretamente ligado a segurança viária é a textura superficial do pavimento, que deve permitir o contato adequado entre pneu-pavimento. Entre os parâmetros que exercem influência no desempenho de misturas asfálticas, destacam-se a granulometria e a volumetria. Para estudar a influência desses parâmetros, esta pesquisa irá utilizar quatro tipos de granulometria (densa, semidescontínua, descontínua e aberta), com três valores de volume de vazios (3%, 4% e 7%) para as misturas densa e semi-descontínua; volume de vazios de 6% para a mistura descontínua e de 19% para a mistura aberta, com aplicação em trechos experimentais. De posse dessas oito misturas asfálticas usinadas a quente, pretende-se avaliar, por meio de ensaios laboratoriais e monitoramento em campo, o efeito da mudança de granulometria e volumetria no desempenho mecânico quanto à fadiga e à deformação permanente, bem como na textura superficial.

#### EXAMES DE QUALIFICAÇÃO

# Análise de durabilidade e textura superficial em restaurações de camada de rolamento de pavimentos asfálticos

Autor(es): OLIVEIRA, M.F.

#### Data da publicação: 2019

#### Anexo: 10.2.1. Oliveira (2019)

**Resumo:** Uma estrutura de pavimento deve ser dimensionada de modo a garantir trafegabilidade, segurança e conforto aos usuários da via. A garantia destes três parâmetros deve ser assegurada sob a ação do tráfego e das condições climáticas a que a rodovia é exposta. A falta ou inadequada manutenção da estrutura, pode acelerar o desenvolvimento de defeitos na estrutura, especialmente fadiga e deformação permanente. A evolução destes defeitos torna necessária a restauração da rodovia, de modo que a nova camada de revestimento asfáltico volte a garantir a trafegabilidade. O processo de restauração conta com etapa de projeto, onde são selecionados os materiais e realizada a dosagem; e de execução, onde ocorre a usinagem (sujeita a erros de teor de ligante e granulometria) e compactação da camada (diretamente ligada ao volume de vazios da camada final). Ambas as etapas precisam ser eficientes para que o revestimento não volte a apresentar os defeitos precocemente. Além disso, outro fator que pode comprometer a segurança dos usuários da via é a textura superficial da camada, responsável pela aderência entre pneu e pavimento e também influenciada pelas características da mistura. Assim, este estudo propõe a análise do efeito da variação da distribuição granulométrica e do volume de vazios de misturas asfálticas quanto ao seu comportamento mecânico e à sua textura superficial. Para a matriz do estudo foram consideradas quatro granulometrias (contínua, semi-descontínua, descontínua e aberta), e duas volumetrias variadas apenas para as granulometrias contínua e descontínua. Em laboratório, as misturas foram caracterizadas quanto às propriedades viscoelásticas lineares, comportamento à deformação permanente e fadiga, macrotextura e microtextura. A análise laboratorial contou também com estudo do processo de compactação das amostras, considerando um novo método com vibração. Em campo, o monitoramento foi feito com extração de corpos de prova de pista, utilizados para caracterização de rigidez e da estrutura interna; e com levantamentos de defeitos, de superficie e deflectométrico. Verificou-se que o processo de compactação interfere no comportamento mecânico quanto à deformação permanente e na macrotextura das amostras. As propriedades viscoelásticas lineares de misturas compactadas em laboratório e características de rigidez de amostras extraídas de pista evidenciam pouca variação de acordo com as variáveis de granulometria e volumetria estudadas. A microtextura também não é afetada por essas variáveis. O trecho experimental apresentou uma série de defeitos que podem não estar exclusivamente

ligados ao tipo de mistura asfáltica, e, maiores análises são necessárias neste ponto. Espera-se poder contribuir para a área de pavimentação asfáltica com novos dados relacionados a diferentes granulometrias e volumetrias de misturas asfálticas, com dados laboratoriais e de campo.

#### **RESUMOS EXPANDIDOS**

Restaurações da camada de rolamento de pavimentos asfálticos visando maior segurança Evento: 26º Simpósio Internacional de Iniciação Científica e Tecnológica da USP Autor(es): MARTINS, G. R.; OLIVEIRA, M. F.; VASCONCELOS. K. L. Data da publicação: 2018 Anexo: 10.3.1. Martins et al. (2018) Resumo: –

# **RELAÇÃO DE ALUNOS CAPACITADOS**

A capacitação de alunos foi realizada durante a execução do projeto, por meio de pesquisas científicas que se enquadram dentro do tema proposto inicialmente. Os principais objetivos específicos do projeto foram incluídos nessas pesquisas e, consequentemente, incorporados às teses, dissertações e artigos científicos produzidos. A tabela abaixo apresenta a relação dos alunos capacitados e as principais informações de suas pesquisas. Todos os alunos estiveram ou estão matriculados em cursos de graduação e pós-graduação da <u>Escola Politécnica da Universidade</u> <u>de São Paulo (POLI/USP)</u>.

Aluno	Categoria	Período	Departamento	Orientador(a)
Marina Frederich de Oliveira	Mestrado	2018-2020	Engenharia de Transportes	Kamilla Vasconcelos
Rodrigo Resende de Vasconcelos	Graduação	2019	Engenharia Civil	Kamilla Vasconcelos
Guilherme Rocha Martins	Graduação	2018	Engenharia Civil	Kamilla Vasconcelos

## PARTICIPAÇÕES EM EVENTOS

#### **CONGRESSOS NACIONAIS E INTERNACIONAIS**

32° Congresso de Pesquisa e Ensino em Transporte
Data: 04/11/2018 – 07/11/2018
Cidade: Gramado, RS, Brasil
Participante(s):
Marina Frederich de Oliveira (Anexo: 12.1.1. Oliveira – ANPET, 2018)
Iuri Sidney Bessa (Anexo: 12.1.2. Bessa – ANPET, 2018)

#### **Transportation Research Board**

Data: 13/01/2019 – 17/01/2019 Cidade: Washington, DC, EUA Participante(s): Kamilla L. Vasconcelos (Anexo: 12.2.1. Vasconcelos - TRB, 2019) Iuri Sidney Bessa (Anexo: 12.2.2. Bessa - TRB, 2019)
# MANUAIS, VÍDEOS, MATERIAIS DIDÁTICOS E PROPOSTAS DE NORMAS

Não houve a produção de material didático e similares durante a presente pesquisa.

## APÊNDICE

Este apêndice apresenta os resultados (tabelas e gráficos) individuais para cada ensaio realizado durante a pesquisa. Os resultados são divididos entre <u>ensaios de laboratório</u> e <u>monitoramento do</u> <u>trecho experimental</u>.

## **ENSAIOS DE LABORATÓRIO**

## Verificação da zona viscoelástica linear no ligante asfáltico

Deformação (%)	Temperatura (°C)	Frequência (Hz)	Módulo de cisalhamento dinâmico (Pa)	Ângulo de fase (°)
1,00006	82,006	1,59155	593,732	71,0620
2,00002	81,994	1,59155	593,534	71,0670
3,00596	81,986	1,59155	590,632	71,0411
4,00411	82,005	1,59155	589,039	71,0311
5,00364	81,997	1,59155	587,925	71,0236
6,00242	82,007	1,59155	587,178	71,0183
7,00131	81,991	1,59155	586,913	71,0238
7,99897	82,008	1,59155	586,975	71,0345
9,00050	82,036	1,59155	586,890	71,0411
10,0001	82,018	1,59155	586,886	71,0468
11,0001	81,980	1,59155	585,989	71,0376
12,0014	82,006	1,59155	585,830	71,0437
13,0001	81,992	1,59155	585,722	71,0606
14,0040	81,988	1,59155	585,296	71,0700
15,0047	82,020	1,59155	584,910	71,0745
16,0051	81,992	1,59155	584,612	71,0784
17,0009	81,992	1,59155	584,366	71,0818
18,0013	81,992	1,59155	584,083	71,0859
18,9989	81,986	1,59155	583,936	71,0922
19,9996	82,001	1,59155	583,814	71,1002

Tabela 34. Ensaio de verificação da zona viscoelástica linear em amostra não-envelhecida



Figura 93. Ensaio de verificação da zona viscoelástica linear em amostra não-envelhecida

Deformação (%)	Temperatura (°C)	Frequência (Hz)	Módulo de cisalhamento dinâmico (Pa)	Ângulo de fase (°)
1,00060	82,024	1,59155	1085,52	67,5150
2,00113	82,018	1,59155	1084,30	67,5259
2,99646	82,023	1,59155	1087,25	67,5444
3,99402	82,010	1,59155	1090,87	67,5615
4,99471	81,988	1,59155	1093,24	67,5744
5,99944	82,007	1,59155	1093,45	67,5840
7,00242	82,000	1,59155	1092,51	67,5871
8,00423	82,023	1,59155	1091,01	67,5908
9,00422	82,001	1,59155	1089,50	67,5953
10,0069	82,036	1,59155	1087,86	67,5993
10,9997	81,971	1,59155	1089,43	67,6108
12,0056	81,999	1,59155	1088,05	67,6169
13,0087	81,997	1,59155	1086,36	67,6222
14,0065	81,999	1,59155	1085,06	67,6285
15,0039	82,008	1,59155	1084,60	67,6380
16,0000	82,004	1,59155	1084,26	67,6463
16,9988	81,998	1,59155	1084,43	67,6585
18,0026	82,005	1,59155	1084,08	67,6724
19,0077	82,015	1,59155	1083,08	67,6829
20,0104	82,006	1,59155	1081,87	67,6921

**Tabela 35.** Ensaio de verificação da zona viscoelástica linear em amostra envelhecida em RTFOT





Figura 94. Ensaio de verificação da zona viscoelástica linear em amostra envelhecida em RTFOT

Deformação (%)	Temperatura (°C)	Frequência (Hz)	Módulo de cisalhamento dinâmico (Pa)	Ângulo de fase (°)
0,0980024	36,971	1,59155	313119	62,8127
0,195869	36,958	1,59155	326787	62,7417
0,294978	36,935	1,59155	338319	62,6663
0,394190	36,915	1,59155	348576	62,6129
0,493066	36,913	1,59155	358738	62,5541
0,982933	36,978	1,59155	371746	62,5678
1,98567	36,917	1,59155	377303	62,5873
2,98152	36,913	1,59155	382176	62,6012
3,96913	36,978	1,59155	388324	62,6177
4,97321	36,917	1,59155	392774	62,6501
0,0979026	15,947	1,59155	1,24836e7	45,0786
0,196195	15,934	1,59155	1,27839e7	44,9175
0,294713	15,991	1,59155	1,30587e7	44,7506
0,393602	15,959	1,59155	1,33060e7	44,6190
0,491946	15,970	1,59155	1,35580e7	44,4988
0,984020	15,989	1,59155	1,38237e7	44,5841
2,04483	16,042	1,59155	1,33134e7	45,3258
3,14914	15,991	1,59155	1,23318e7	46,6583
4,14140	15,981	1,59155	1,16841e7	47,9921
5,15805	15,987	1,59155	1,11429e7	49,3671

Tabela 36. Ensaio de verificação da zona viscoelástica linear em amostra envelhecida em PAV

ZL\_16C37C\_10rads\_REGIS\_6085\_PAV\_AM1



Figura 95. Ensaio de verificação da zona viscoelástica linear em amostra envelhecida em PAV

#### Obtenção das propriedades reológicas do ligante asfáltico

Deformação (%)	Temperatura (°C)	Frequência (Hz)	Módulo de cisalhamento dinâmico (Pa)	Ângulo de fase (°)
12,0081	58,032	1,59155	6051,61	68,8722
9,61222	64,019	1,59155	3197,83	68,5170
10,6736	69,992	1,59155	1764,54	68,8844
11,2654	76,016	1,59155	1009,35	69,7919
11,5813	82,014	1,59155	604,193	70,9588

**Tabela 37.** Ensaio de obtenção das propriedades reológicas em amostra não-envelhecida(amostra 01)

**Tabela 38.** Ensaio de obtenção das propriedades reológicas em amostra não-envelhecida(amostra 02)

Deformação (%)	Temperatura (°C)	Frequência (Hz)	Módulo de cisalhamento dinâmico (Pa)	Ângulo de fase (°)
12,0129	58,022	1,59155	6060,11	68,7606
9,59209	64,025	1,59155	3219,17	68,4313
10,6552	70,011	1,59155	1785,77	68,8340
11,2534	76,024	1,59155	1024,24	69,7920
11,5758	81,980	1,59155	610,424	71,0002

**Tabela 39.** Ensaio de obtenção das propriedades reológicas em amostra envelhecida em RTFOT<br/>(amostra 01)

Deformação (%)	Temperatura (°C)	Frequência (Hz)	Módulo de cisalhamento dinâmico (Pa)	Ângulo de fase (°)
9,99660	58,048	1,59155	11319,4	66,8879
6,50053	64,018	1,59155	5946,76	66,1412
7,85673	70,003	1,59155	3320,76	66,0305
8,74247	76,031	1,59155	1911,71	66,5484
9,26951	82,046	1,59155	1132,44	67,4839

Deformação (%)	Temperatura (°C)	Frequência (Hz)	Módulo de cisalhamento dinâmico (Pa)	Ângulo de fase (°)
10,0012	58,041	1,59155	11233,1	67,0862
6,53867	64,023	1,59155	5874,77	66,3487
7,92581	70,005	1,59155	3214,56	66,2731
8,79629	76,018	1,59155	1837,13	66,8178
9,30067	81,997	1,59155	1090,19	67,7651

**Tabela 40.** Ensaio de obtenção das propriedades reológicas em amostra envelhecida em RTFOT<br/>(amostra 02)

 Tabela 41. Ensaio de obtenção das propriedades reológicas em amostra envelhecida em PAV (amostra 01)

Deformação (%)	Temperatura (°C)	Frequência (Hz)	Módulo de cisalhamento dinâmico (Pa)	Ângulo de fase (°)
0,998254	37,002	1,59155	406379	61,8123
0,730012	34,034	1,59155	730736	59,7391
1,00716	28,028	1,59155	2174610	54,9327
0,286214	25,001	1,59155	3874860	51,3135
0,185208	22,021	1,59155	6581760	47,6661
0,120837	18,949	1,59155	1,06622e7	44,0709

**Tabela 42.** Ensaio de obtenção das propriedades reológicas em amostra envelhecida em PAV<br/>(amostra 02)

Deformação (%)	Temperatura (°C)	Frequência (Hz)	Módulo de cisalhamento dinâmico (Pa)	Ângulo de fase (°)
0,993383	37,007	1,59155	283502	62,8526
0,770491	33,991	1,59155	609234	60,5836
0,619715	30,997	1,59155	1126190	58,1113
0,455349	27,972	1,59155	2003950	55,2294
0,306965	24,951	1,59155	3536490	51,8175
0,200367	22,010	1,59155	5999850	48,1752
0,130272	19,024	1,59155	9808940	44,5295
0,0877549	16,048	1,59155	1,50904e7	41,1227

## Obtenção da curva mestra do ligante asfáltico



Figura 96. Ensaio de curva mestra: temperaturas de 0 a 40°C (amostra 01)



Figura 97. Ensaio de curva mestra: temperaturas de 0 a 40°C (amostra 02)



Figura 98. Ensaio de curva mestra: temperaturas de 40 a 80°C (amostra 01)



Figura 99. Ensaio de curva mestra: temperaturas de 40 a 80°C (amostra 02)



**Figura 100.** Ensaio de curva mestra em amostra envelhecida no RTFOT: temperaturas de 0 a 40°C (amostra 01)



Figura 101. Ensaio de curva mestra em amostra envelhecida no RTFOT: temperaturas de 40 a 80°C (amostra 01)



Figura 102. Ensaio de curva mestra em amostra envelhecida no RTFOT: temperaturas de 40 a 80°C (amostra 02)



Figura 103. Ensaio de curva mestra em amostra envelhecida no PAV: temperaturas de 0 a 40°C (amostra 01)

## Ensaio de multiple-stress creep recovery no ligante asfáltico

100 Pa	Ciclo	eo	ec	e1	er	<b>e</b> 10	erec	R%(100,n)	<b>J</b> nr(100,n)
	1	0,273064	0,363971	0,090907	0,2965	0,023459	0,067448	0,741945	0,23459
	2	0,295896	0,387333	0,091437	0,3195	0,023627	0,06781	0,741604	0,23627
	3	0,318878	0,410268	0,09139	0,3421	0,0232	0,06819	0,746143	0,232
	4	0,341447	0,43223	0,090783	0,3637	0,022206	0,068577	0,755395	0,22206
	5	0,363009	0,454224	0,091215	0,3858	0,022758	0,068457	0,750502	0,22758
	6	0,385103	0,476424	0,091321	0,4078	0,022678	0,068643	0,751667	0,22678
	7	0,407121	0,498218	0,091097	0,4290	0,021893	0,069204	0,759674	0,21893
	8	0,428375	0,519205	0,09083	0,4502	0,02182	0,06901	0,759771	0,2182
	9	0,449524	0,540681	0,091157	0,4715	0,022024	0,069133	0,758395	0,22024
	10	0,470862	0,562203	0,091341	0,4929	0,022053	0,069288	0,758564	0,22053

Tabela 43. Ensaio de multiple-stress creep recovery (MSCR): temperatura de 64°C (amostra 01)

3200 Pa	Ciclo	eo	ec	e1	er	<b>e</b> 10	erec	<b>R%</b> (3200,n)	Jnr(3200,n)
	1	0,492238	3,37633	2,884092	1,66664	1,174402	1,70969	0,5928	0,367001
	2	1,65767	4,4879	2,83023	2,61702	0,95935	1,87088	0,661035	0,299797
	3	2,60463	5,43078	2,82615	3,49169	0,88706	1,93909	0,686124	0,277206
	4	3,47807	6,30593	2,82786	4,3313	0,85323	1,97463	0,698277	0,266634
	5	4,31636	7,14703	2,83067	5,1537	0,83734	1,99333	0,70419	0,261669
	6	5,13828	7,97057	2,83229	5,96486	0,82658	2,00571	0,708158	0,258306
	7	5,94925	8,78421	2,83496	6,77293	0,82368	2,01128	0,709456	0,2574
	8	6,75722	9,59134	2,83412	7,57871	0,82149	2,01263	0,710143	0,256716
	9	7,56253	10,3974	2,83487	8,38291	0,82038	2,01449	0,710611	0,256369
	10	8.36678	11.2034	2.83662	9,18839	0.82161	2.01501	0.710356	0.256753

100 Pa	Ciclo	e <sub>0</sub>	ec	e1	er	e <sub>10</sub>	e <sub>rec</sub>	R%(100,n)	J <sub>nr(100,n)</sub>
	1	0,274966	0,366373	0,091407	0,2984	0,023407	0,068	0,743926	0,23407
	2	0,297754	0,389442	0,091688	0,3214	0,023604	0,068084	0,742562	0,23604
	3	0,32071	0,412804	0,092094	0,3442	0,023485	0,068609	0,744989	0,23485
	4	0,343557	0,435038	0,091481	0,3661	0,022557	0,068924	0,753424	0,22557
	5	0,365471	0,456907	0,091436	0,3879	0,022451	0,068985	0,754462	0,22451
	6	0,387251	0,479242	0,091991	0,4103	0,023042	0,068949	0,749519	0,23042
	7	0,409646	0,501231	0,091585	0,4318	0,02216	0,069425	0,758039	0,2216
	8	0,431155	0,522474	0,091319	0,4529	0,021743	0,069576	0,761901	0,21743
	9	0,452236	0,543788	0,091552	0,4743	0,022111	0,069441	0,758487	0,22111
	10	0,473586	0,565685	0,092099	0,4959	0,02229	0,069809	0,757978	0,2229

Tabela 44. Ensaio de multiple-stress creep recovery (MSCR): temperatura de 64°C (amostra 02)

3200 Pa	Ciclo	eo	ec	e1	er	<b>e</b> 10	erec	<b>R%</b> (3200,n)	Jnr(3200,n)
	1	0,495196	3,39592	2,900724	1,67864	1,183444	1,71728	0,592018	0,369826
	2	1,66932	4,51869	2,84937	2,63719	0,96787	1,8815	0,660321	0,302459
	3	2,62451	5,46865	2,84414	3,51753	0,89302	1,95112	0,686014	0,279069
	4	3,50375	6,34904	2,84529	4,36205	0,8583	1,98699	0,698344	0,268219
	5	4,34737	7,19323	2,84586	5,18714	0,83977	2,00609	0,704915	0,262428
	6	5,17188	8,02097	2,84909	6,00139	0,82951	2,01958	0,708851	0,259222
	7	5,98525	8,83625	2,851	6,80993	0,82468	2,02632	0,71074	0,257713
	8	6,79405	9,64576	2,85171	7,61574	0,82169	2,03002	0,711861	0,256778
	9	7,59903	10,4541	2,85507	8,42037	0,82134	2,03373	0,712322	0,256669
	10	8,40416	11,2593	2,85514	9,22668	0,82252	2,03262	0,711916	0,257038

100 Pa	Ciclo	eo	ec	e <sub>1</sub>	er	e <sub>10</sub>	e <sub>rec</sub>	R%(100,n)	J <sub>nr(100,n)</sub>
	1	0,618146	0,790408	0,172262	0,6744	0,056228	0,116034	0,67359	0,56228
	2	0,673317	0,845374	0,172057	0,7284	0,055076	0,116981	0,679897	0,55076
	3	0,7273	0,899664	0,172364	0,7814	0,054146	0,118218	0,685862	0,54146
	4	0,780378	0,952831	0,172453	0,8351	0,054694	0,117759	0,682847	0,54694
	5	0,833997	1,00564	0,171643	0,8878	0,053843	0,1178	0,686308	0,53843
	6	0,88673	1,05881	0,17208	0,9396	0,052909	0,119171	0,692533	0,52909
	7	0,938529	1,11102	0,172491	0,9923	0,053817	0,118674	0,688001	0,53817
	8	0,991239	1,1627	0,171461	1,0443	0,053071	0,11839	0,690478	0,53071
	9	1,04318	1,21519	0,17201	1,0953	0,05215	0,11986	0,69682	0,5215
	10	1,09419	1,26663	0,17244	1,1473	0,05307	0,11937	0,692241	0,5307

Tabela 45. Ensaio de multiple-stress creep recovery (MSCR): temperatura de 70°C (amostra 01)

3200 Pa	Ciclo	eo	ec	e1	er	<b>e</b> 10	erec	R%(3200,n)	Jnr(3200,n)
	1	1,14616	6,34669	5,20053	3,50552	2,35936	2,84117	0,546323	0,7373
	2	3,49059	8,70664	5,21605	5,67095	2,18036	3,03569	0,58199	0,681363
	3	5,65252	10,9238	5,27128	7,86188	2,20936	3,06192	0,580868	0,690425
	4	7,8418	13,1498	5,308	10,1017	2,2599	3,0481	0,574246	0,706219
	5	10,0798	15,4139	5,3341	12,3871	2,3073	3,0268	0,567443	0,721031
	6	12,3672	17,7173	5,3501	14,7133	2,3461	3,004	0,561485	0,733156
	7	14,6932	20,0507	5,3575	17,0671	2,3739	2,9836	0,556902	0,741844
	8	17,0494	22,4128	5,3634	19,445	2,3956	2,9678	0,553343	0,748625
	9	19,4261	24,7922	5,3661	21,8435	2,4174	2,9487	0,549505	0,755438
	10	21,8246	27,194	5,3694	24,2511	2,4265	2,9429	0,548087	0,758281

100 Pa	Ciclo	e <sub>0</sub>	e <sub>c</sub>	e <sub>1</sub>	e <sub>r</sub>	e <sub>10</sub>	e <sub>rec</sub>	R%(100,n)	J <sub>nr(100,n)</sub>
	1	0,602354	0,774369	0,172015	0,6566	0,054294	0,117721	0,684365	0,54294
	2	0,655619	0,826981	0,171362	0,7094	0,053766	0,117596	0,686243	0,53766
	3	0,708354	0,879752	0,171398	0,7614	0,053082	0,118316	0,6903	0,53082
	4	0,760367	0,932047	0,17168	0,8129	0,052501	0,119179	0,694193	0,52501
	5	0,811798	0,983287	0,171489	0,8645	0,052702	0,118787	0,69268	0,52702
	6	0,863398	1,03474	0,171342	0,9154	0,052022	0,11932	0,696385	0,52022
	7	0,914292	1,08599	0,171698	0,9659	0,051649	0,120049	0,699187	0,51649
	8	0,96485	1,13613	0,17128	1,0166	0,0517	0,11958	0,698155	0,517
	9	1,01543	1,18672	0,17129	1,0668	0,05135	0,11994	0,700216	0,5135
	10	1,06563	1,23719	0,17156	1,1167	0,05103	0,12053	0,702553	0,5103

Tabela 46. Ensaio de multiple-stress creep recovery (MSCR): temperatura de 70°C (amostra 02)

3200 Pa	Ciclo	e <sub>0</sub>	e <sub>c</sub>	e <sub>1</sub>	er	e <sub>10</sub>	e <sub>rec</sub>	R‰(3200,n)	J <sub>nr(3200,n)</sub>
	1	1,11562	6,26629	5,15067	3,40871	2,29309	2,85758	0,554798	0,716591
	2	3,39445	8,55048	5,15603	5,49107	2,09662	3,05941	0,593365	0,655194
	3	5,47284	10,6863	5,21346	7,59834	2,1255	3,08796	0,592305	0,664219
	4	7,57786	12,8272	5,24934	9,74329	2,16543	3,08391	0,587485	0,676697
	5	9,72242	14,9967	5,27428	11,9342	2,21178	3,0625	0,580648	0,691181
	6	11,9143	17,2072	5,2929	14,1634	2,2491	3,0438	0,575072	0,702844
	7	14,1438	19,443	5,2992	16,4226	2,2788	3,0204	0,569973	0,712125
	8	16,402	21,7091	5,3071	18,7019	2,2999	3,0072	0,566637	0,718719
	9	18,683	23,996	5,313	21,0051	2,3221	2,9909	0,56294	0,725656
	10	20,9863	26,2997	5,3134	23,3167	2,3304	2,983	0,561411	0,72825

100 Pa	Ciclo	eo	ec	e1	er	<b>e</b> 10	erec	<b>R%</b> (100,n)	Jnr(100,n)
	1	1,34549	1,66268	0,31719	1,4708	0,12534	0,19185	0,604843	1,2534
	2	1,46923	1,78614	0,31691	1,5948	0,12557	0,19134	0,603768	1,2557
	3	1,59315	1,90979	0,31664	1,7169	0,12379	0,19285	0,609051	1,2379
	4	1,71534	2,03231	0,31697	1,8395	0,12415	0,19282	0,608323	1,2415
	5	1,83786	2,15432	0,31646	1,9616	0,12372	0,19274	0,60905	1,2372
	6	1,95987	2,27648	0,31661	2,0828	0,12297	0,19364	0,611604	1,2297
	7	2,08148	2,3977	0,31622	2,2051	0,12366	0,19256	0,608943	1,2366
	8	2,20346	2,51997	0,31651	2,3260	0,12251	0,194	0,612935	1,2251
	9	2,32428	2,64114	0,31686	2,4481	0,12377	0,19309	0,609386	1,2377
	10	2,44633	2,76275	0,31642	2,5694	0,12304	0,19338	0,61115	1,2304

Tabela 47. Ensaio de multiple-stress creep recovery (MSCR): temperatura de 76°C (amostra 01)

3200 Pa	Ciclo	e <sub>0</sub>	ec	e1	er	e <sub>10</sub>	e <sub>rec</sub>	R%(3200,n)	J <sub>nr(3200,n)</sub>
	1	2,56758	11,866	9,29842	7,79102	5,22344	4,07498	0,438244	1,632325
	2	7,77243	17,4792	9,70677	13,5086	5,73617	3,9706	0,409055	1,792553
	3	13,4888	23,3682	9,8794	19,5644	6,0756	3,8038	0,385023	1,898625
	4	19,5455	29,4762	9,9307	25,7669	6,2214	3,7093	0,373518	1,944188
	5	25,7495	35,6896	9,9401	32,0147	6,2652	3,6749	0,369705	1,957875
	6	31,9983	41,9452	9,9469	38,2797	6,2814	3,6655	0,368507	1,962938
	7	38,2644	48,2028	9,9384	44,5368	6,2724	3,666	0,368872	1,960125
	8	44,5206	54,4593	9,9387	50,7846	6,264	3,6747	0,369736	1,9575
	9	50,7683	60,701	9,9327	57,0198	6,2515	3,6812	0,370614	1,953594
	10	57,0033	66,9365	9,9332	63,2431	6,2398	3,6934	0,371824	1,949938

100 Pa	Ciclo	eo	ec	e1	er	<b>e</b> 10	erec	R%(100,n)	Jnr(100,n)
	1	1,37914	1,69999	0,32085	1,5070	0,12786	0,19299	0,601496	1,2786
	2	1,50537	1,82595	0,32058	1,6315	0,12608	0,1945	0,606713	1,2608
	3	1,62984	1,95049	0,32065	1,7556	0,12576	0,19489	0,607797	1,2576
	4	1,7539	2,07414	0,32024	1,8792	0,12533	0,19491	0,608637	1,2533
	5	1,87758	2,19817	0,32059	2,0022	0,12463	0,19596	0,611248	1,2463
	6	2,00052	2,32186	0,32134	2,1257	0,12521	0,19613	0,61035	1,2521
	7	2,12386	2,44432	0,32046	2,2487	0,12486	0,1956	0,610373	1,2486
	8	2,24701	2,56778	0,32077	2,3710	0,12398	0,19679	0,613493	1,2398
	9	2,36931	2,68949	0,32018	2,4942	0,12489	0,19529	0,609938	1,2489
	10	2,49269	2,81291	0,32022	2,6163	0,12365	0,19657	0,613859	1,2365

Tabela 48. Ensaio de multiple-stress creep recovery (MSCR): temperatura de 76°C (amostra 02)

3200 Pa	Ciclo	e <sub>0</sub>	ec	e1	er	e <sub>10</sub>	e <sub>rec</sub>	R%(3200,n)	J <sub>nr(3200,n)</sub>
	1	2,61469	11,96	9,34531	7,84978	5,23509	4,11022	0,439816	1,635966
	2	7,83098	17,653	9,82202	13,6642	5,83322	3,9888	0,406108	1,822881
	3	13,6438	23,6533	10,0095	19,8399	6,1961	3,8134	0,380978	1,936281
	4	19,8219	29,885	10,0631	26,1608	6,3389	3,7242	0,370085	1,980906
	5	26,1464	36,2305	10,0841	32,5397	6,3933	3,6908	0,366002	1,997906
	6	32,5232	42,6213	10,0981	38,9349	6,4117	3,6864	0,365059	2,003656
	7	38,9188	49,0077	10,0889	45,3275	6,4087	3,6802	0,364777	2,002719
	8	45,3102	55,3892	10,079	51,7027	6,3925	3,6865	0,36576	1,997656
	9	51,6862	61,7569	10,0707	58,0554	6,3692	3,7015	0,367551	1,990375
	10	58,0392	68,1228	10,0836	64,4103	6,3711	3,7125	0,368172	1,990969

100 Pa	Ciclo	eo	ec	e1	er	<b>e</b> 10	erec	R%(100,n)	Jnr(100,n)
	1	2,79499	3,36002	0,56503	3,0669	0,27188	0,29315	0,518822	2,7188
	2	3,06464	3,63023	0,56559	3,3366	0,27199	0,2936	0,519104	2,7199
	3	3,33443	3,89931	0,56488	3,6061	0,27166	0,29322	0,519084	2,7166
	4	3,6037	4,16949	0,56579	3,8768	0,27309	0,2927	0,51733	2,7309
	5	3,87467	4,43889	0,56422	4,1471	0,27244	0,29178	0,517139	2,7244
	6	4,14489	4,70981	0,56492	4,4178	0,27289	0,29203	0,51694	2,7289
	7	4,41568	4,97974	0,56406	4,6880	0,27235	0,29171	0,517161	2,7235
	8	4,68584	5,25093	0,56509	4,9593	0,27349	0,2916	0,516024	2,7349
	9	4,95725	5,52161	0,56436	5,2309	0,27368	0,29068	0,515061	2,7368
	10	5,22915	5,79292	0,56377	5,5022	0,27303	0,29074	0,515707	2,7303

Tabela 49. Ensaio de multiple-stress creep recovery (MSCR): temperatura de 82°C (amostra 01)

3200 Pa	Ciclo	e <sub>0</sub>	e <sub>c</sub>	e1	er	e <sub>10</sub>	<b>e</b> <sub>rec</sub>	R%(3200,n)	J <sub>nr(3200,n)</sub>
	1	5,50055	22,8322	17,33165	18,8358	13,33525	3,9964	0,230584	4,167266
	2	18,8219	37,6512	18,8293	34,3499	15,528	3,3013	0,175328	4,8525
	3	34,3395	53,2005	18,861	49,9407	15,6012	3,2598	0,172833	4,875375
	4	49,9304	68,7311	18,8007	65,4346	15,5042	3,2965	0,175339	4,845063
	5	65,4312	84,2041	18,7729	80,8951	15,4639	3,309	0,176265	4,832469
	6	80,8848	99,6475	18,7627	96,3125	15,4277	3,335	0,177746	4,821156
	7	96,302	115,039	18,737	111,713	15,411	3,326	0,17751	4,815938
	8	111,702	130,408	18,706	127,062	15,36	3,346	0,178873	4,8
	9	127,051	145,775	18,724	142,412	15,361	3,363	0,179609	4,800313
	10	142,401	161,139	18,738	157,804	15,403	3,335	0,177981	4,813438

100 Pa	Ciclo	eo	ec	e1	er	<b>e</b> 10	erec	R%(100,n)	Jnr(100,n)
	1	2,66052	3,21252	0,552	2,9195	0,25898	0,29302	0,530833	2,5898
	2	2,91736	3,47018	0,55282	3,1774	0,26005	0,29277	0,529594	2,6005
	3	3,17525	3,72761	0,55236	3,4346	0,25938	0,29298	0,530415	2,5938
	4	3,4325	3,98489	0,55239	3,6920	0,25952	0,29287	0,530187	2,5952
	5	3,68985	4,24346	0,55361	3,9507	0,26088	0,29273	0,528766	2,6088
	6	3,94864	4,50215	0,55351	4,2088	0,26012	0,29339	0,530054	2,6012
	7	4,2069	4,76023	0,55333	4,4680	0,26114	0,29219	0,528057	2,6114
	8	4,46585	5,01954	0,55369	4,7273	0,26149	0,2922	0,527732	2,6149
	9	4,72522	5,279	0,55378	4,9865	0,26129	0,29249	0,52817	2,6129
	10	4,98461	5,53901	0,5544	5,2470	0,26238	0,29202	0,526732	2,6238

Tabela 50. Ensaio de multiple-stress creep recovery (MSCR): temperatura de 82°C (amostra 02)

3200 Pa	Ciclo	e <sub>o</sub>	ec	e1	er	e <sub>10</sub>	e <sub>rec</sub>	R%(3200,n)	J <sub>nr(3200,n)</sub>
	1	5,24485	22,2341	16,98925	18,0821	12,83725	4,152	0,24439	4,011641
	2	18,0681	36,6287	18,5606	33,1669	15,0988	3,4618	0,186513	4,718375
	3	33,1552	51,8331	18,6779	48,4409	15,2857	3,3922	0,181616	4,776781
	4	48,4292	67,0465	18,6173	63,6101	15,1809	3,4364	0,184581	4,744031
	5	63,5995	82,2026	18,6031	78,7539	15,1544	3,4487	0,185383	4,73575
	6	78,743	97,3123	18,5693	93,8505	15,1075	3,4618	0,186426	4,721094
	7	93,8416	112,42	18,5784	108,969	15,1274	3,451	0,185753	4,727313
	8	108,958	127,573	18,615	124,117	15,159	3,456	0,185657	4,737188
	9	124,106	142,76	18,654	139,299	15,193	3,461	0,185537	4,747813
	10	139,288	157,964	18,676	154,502	15,214	3,462	0,185372	4,754375

	64°C		70	°C	76	°C	82	°C
	Amo	ostra	Amostra		Amo	ostra	Amo	ostra
	1	2	1	2	1	2	1	2
	0,23	0,23	0,54	0,52	1,24	1,25	2,73	2,61
<b>Jnr,100</b>	Média	DP	Média	DP	Média	DP	Média	DP
	0,23	0,00	0,53	0,01	1,25	0,01	2,67	0,08
	75,20	75,30	68,70	69,40	60,90	60,90	51,70	52,90
<b>R100</b>	Média	DP	Média	DP	Média	DP	Média	DP
	75,25	0,07	69,05	0,49	60,90	0,00	52,30	0,85
	0,28	0,28	0,73	0,70	1,90	1,94	4,76	4,67
Jnr,3200	Média	DP	Média	DP	Média	DP	Média	DP
	0,28	0,00	0,72	0,02	1,92	0,03	4,72	0,06
	68,90	69,00	56,20	57,40	38,30	37,90	18,20	19,10
<b>R3200</b>	Média	DP	Média	DP	Média	DP	Média	DP
	68,95	0,07	56,80	0,85	38,10	0,28	18,65	0,64
	22,00	22,00	35,00	33,00	53,00	55,00	75,00	79,00
Jnr,diff	Média	DP	Média	DP	Média	DP	Média	DP
	22,00	0,00	34,00	1,41	54,00	1,41	77,00	2,83

Tabela 51. Ensaio de multiple-stress creep recovery (MSCR): resumo dos resultados

## Ensaio de linear amplitude sweep no ligante asfáltico

Sample:		Damage level:	0,578
Model:	$C(t) = C_0 - C_1(D)^{\wedge}C_2$		
$C_{\theta}$	$C_1$	$C_2$	Summed Error
1,000	0,095	0,412	
$\tau_{max}$ (Pa)	922947		
α	$ G^* _{initial}$	$D_f$	k
1,701	22519722,222	81	2,000
A	B	Applied Strain [%]	N <sub>f</sub>
1,154E+06	-3,402	2,5	51.111
		5,0	4.835

**Tabela 52.** Ensaio de linear amplitude sweep (LAS): temperatura de 20°C (amostra 01)



Figura 104. Ensaio de linear amplitude sweep (LAS): temperatura de 20°C (amostra 01)

Sample:		Damage level:	0,567
Model:	$C(t) = C_0 - C_1(D)^{\wedge}C_2$		
Co	$C_1$	$C_2$	Summed Error
1,000	0,106	0,398	
$\tau_{max}$ (Pa)	966138		
α	$ G^* $ initial	$D_f$	k
1,693	23209766,667	68	2,019
A	В	Applied Strain [%]	$N_f$
7,616E+05	-3,386	2,5	34.224
		5,0	3.274

Tabela 53. Ensaio de linear amplitude sweep (LAS): temperatura de 20°C (amostra 02)



Figura 105. Ensaio de linear amplitude sweep (LAS): temperatura de 20°C (amostra 01)

Sample:		Damage level:	0,539
Model:	$C(t) = C_0 - C_1(D)^{\wedge}C_2$		
Co	$C_1$	$C_2$	Summed Error
1,000	0,066	0,461	
$\tau_{max}$ (Pa)	588455		
α	$ G^* $ initial	$D_f$	k
1,505	10502955,556	93	1,810
A	B	Applied Strain [%]	$N_f$
6,882E+05	-3,009	2,5	43.670
		5,0	5.424

Tabela 54. Ensaio de linear amplitude sweep (LAS): temperatura de 25°C (amostra 01)



Figura 106. Ensaio de linear amplitude sweep (LAS): temperatura de 25°C (amostra 01)

Sample:		Damage level:	0,542
Model:	$C(t) = C_0 - C_1(D)^{\wedge}C_2$		
Co	$C_1$	$C_2$	Summed Error
1,000	0,080	0,432	
$\tau_{max}$ (Pa)	520675		
α	$ G^* $ initial	$D_f$	k
1,620	9998013,333	85	1,920
A	В	Applied Strain [%]	$N_f$
9,695E+05	-3,240	2,5	49.812
		5,0	5.273

Tabela 55. Ensaio de linear amplitude sweep (LAS): temperatura de 25°C (amostra 02)



Figura 107. Ensaio de linear amplitude sweep (LAS): temperatura de 25°C (amostra 02)

Sample:		Damage level:	0,562
Model:	$C(t) = C_0 - C_1(D)^{\wedge}C_2$		
Co	$C_1$	$C_2$	Summed Error
1,000	0,064	0,458	
$\tau_{max}$ (Pa)	492310		
α	$ G^* $ initial	$D_f$	k
1,516	8103954,444	116	1,822
A	В	Applied Strain [%]	$N_f$
1,182E+06	-3,033	2,5	73.399
		5,0	8.968

Tabela 56. Ensaio de linear amplitude sweep (LAS): temperatura de 30°C (amostra 01)



Figura 108. Ensaio de linear amplitude sweep (LAS): temperatura de 30°C (amostra 01)

Sample:		Damage level:	0,535
Model:	$C(t) = C_0 - C_1(D)^{\wedge}C_2$		
Co	$C_1$	$C_2$	Summed Error
1,000	0,064	0,461	
$\tau_{max}$ (Pa)	453263		
α	$ G^* $ initial	$D_f$	k
1,512	7678272,222	100	1,816
A	B	Applied Strain [%]	$N_f$
8,613E+05	-3,023	2,5	53.947
		5,0	6.634

Tabela 57. Ensaio de linear amplitude sweep (LAS): temperatura de 30°C (amostra 02)



Figura 109. Ensaio de linear amplitude sweep (LAS): temperatura de 30°C (amostra 02)





**Figura 110.** Ensaio de deformação permanente no simulador de tráfego: gap-graded (GAP) – compactação vibrada (amostra 01)



**Figura 111.** Ensaio de deformação permanente no simulador de tráfego: gap-graded (GAP) – compactação vibrada (amostra 02)



**Figura 112.** Ensaio de deformação permanente no simulador de tráfego: gap-graded (GAP) – compactação padrão (amostra 01)



Figura 113. Ensaio de deformação permanente no simulador de tráfego: gap-graded (GAP) – compactação padrão (amostra 02)



Figura 114. Ensaio de deformação permanente no simulador de tráfego: concreto asfáltico (CA) – compactação vibrada (amostra 01)



Figura 115. Ensaio de deformação permanente no simulador de tráfego: concreto asfáltico (CA) – compactação vibrada (amostra 02)



Figura 116. Ensaio de deformação permanente no simulador de tráfego: concreto asfáltico (CA) – compactação padrão (amostra 01)



Figura 117. Ensaio de deformação permanente no simulador de tráfego: concreto asfáltico (CA) – compactação padrão (amostra 02)



**Figura 118.** Ensaio de deformação permanente no simulador de tráfego: semi-descontínua (SEMI) – compactação vibrada (amostra 01)



Figura 119. Ensaio de deformação permanente no simulador de tráfego: semi-descontínua (SEMI) – compactação vibrada (amostra 02)



Figura 120. Ensaio de deformação permanente no simulador de tráfego: semi-descontínua (SEMI) – compactação padrão (amostra 01)



Figura 121. Ensaio de deformação permanente no simulador de tráfego: semi-descontínua (SEMI) – compactação padrão (amostra 02)

### Ensaio de mancha de areia nas misturas asfálticas de laboratório

Placa	Mistura	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Medida 4	Média	Hs1	Desvio
1	CPA (V)	115	119	118	118	117,5	1,15	1,73
2	CPA (V)	102	115	103	111	107,75	1,37	6,29
3	CPA (P)	90	90	95	90	91,25	1,91	2,50
4b	CPA (V)	109	101	92	108	102,5	1,51	7,85
5	CPA (P)	107	104	107	101	104,75	1,45	2,87
6	CPA (P)	106	107	106	102	105,25	1,44	2,22
7b	GAP (V)	102	120	111	112	111,25	1,29	7,37
8	GAP (P)	134	115	123	123	123,75	1,04	7,80
9	GAP (P)	123	114	120	110	116,75	1,17	5,85
10	GAP (V)	116	128	112	120	119	1,12	6,83
11	GAP (V)	121	111	109	109	112,5	1,26	5,74
12	GAP (P)	118	120	118	111	116,75	1,17	3,95
13	CA (V)	123	150	149	122	136	0,86	15,60
14	CA(V)	120	149	130	145	136	0,86	13,44
15	CA (P)	125	131	118	114	122	1,07	7,53
16	CA(V)	148	149	133	142	143	0,78	7,35
17	CA (P)	107	134	115	124	120	1,11	11,63
18	CA (P)	139	130	121	136	131,5	0,92	7,94
19	SD (V)	120	125	125	135	126,25	1,00	6,29
20	SD (V)	123	138	134	136	132,75	0,90	6,70
21	SD (V)	152	147	150	145	148,5	0,72	3,11
22	SD (P)	108	156	129	120	128,25	0,97	20,40
23	SD (P)	130	102	115	102	112,25	1,26	13,33
24	SD (P)	119	123	125	122	122,25	1,06	2,50

Tabela 58. Ensaio de mancha de areia em laboratório na condição inicial (posição 1)

Placa	Mistura	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Medida 4	Média	Hs1	Desvio
1	CPA (V)	106	114	107	109	109	1,34	3,56
2	CPA (V)	116	107	90	109	105,5	1,43	11,03
3	CPA (P)	80	75	80	80	78,75	2,57	2,50
4b	CPA (V)	122	116	128	105	117,75	1,15	9,81
5	CPA (P)	104	102	97	102	101,25	1,55	2,99
6	CPA (P)	99	100	115	104	104,5	1,46	7,33
7b	GAP (V)	121	129	117	119	121,5	1,08	5,26
8	GAP (P)	117	119	127	122	121,25	1,08	4,35
9	GAP (P)	121	115	127	113	119	1,12	6,32
10	GAP (V)	120	123	122	120	121,25	1,08	1,50
11	GAP (V)	120	132	127	118	124,25	1,03	6,45
12	GAP (P)	119	110	109	114	113	1,25	4,55
13	CA (V)	140	157	142	139	144,5	0,76	8,43
14	CA (V)	124	169	134	127	138,5	0,83	20,76
15	CA (P)	123	125	126	116	122,5	1,06	4,51
16	CA (V)	141	161	140	147	147,25	0,73	9,67
17	CA (P)	132	139	126	127	131	0,93	5,94
18	CA (P)	123	122	116	113	118,5	1,13	4,80
19	SD (V)	122	151	135	141	137,25	0,84	12,12
20	SD (V)	122	145	140	132	134,75	0,88	10,05
21	SD (V)	122	148	143	145	139,5	0,82	11,85
22	SD (P)	151	108	123	106	122	1,07	20,77
23	SD (P)	120	105	115	111	112,75	1,25	6,34
24	SD (P)	107	130	112	122	117,75	1,15	10,28

**Tabela 59.** Ensaio de mancha de areia em laboratório na condição inicial (posição 2)

Placa	Mistura	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Medida 4	Média	Hs1	Desvio
1	CPA (V)	105	104	103	92	101	1,56	6,06
2	CPA (V)	100	117	99	107	105,75	1,42	8,30
3	CPA (P)	95	80	90	90	88,75	2,02	6,29
4b	CPA (V)	112	120	112	118	115,5	1,19	4,12
5	CPA (P)	124	102	98	110	108,5	1,35	11,47
6	CPA (P)	104	109	102	109	106	1,42	3,56
7b	GAP (V)	150	124	136	129	134,75	0,88	11,30
8	GAP (P)	133	119	124	132	127	0,99	6,68
9	GAP (P)	112	127	137	110	121,5	1,08	12,82
10	GAP (V)	135	136	136	132	134,75	0,88	1,89
11	GAP (V)	130	128	116	124	124,5	1,03	6,19
12	GAP (P)	121	108	111	122	115,5	1,19	7,05
13	CA (V)	135	163	145	141	146	0,75	12,06
14	CA (V)	140	164	149	129	145,5	0,75	14,80
15	CA (P)	150	149	143	130	143	0,78	9,20
16	CA (V)	160	160	160	155	158,75	0,63	2,50
17	CA (P)	146	108	120	129	125,75	1,01	16,01
18	CA (P)	149	117	114	132	128	0,97	16,06
19	SD (V)	144	131	134	134	135,75	0,86	5,68
20	SD (V)	135	140	140	140	138,75	0,83	2,50
21	SD (V)	120	158	130	142	137,5	0,84	16,36
22	SD (P)	104	129	116	107	114	1,22	11,22
23	SD (P)	117	121	120	120	119,5	1,11	1,73
24	SD (P)	107	128	116	126	119,25	1,12	9,71

**Tabela 60.** Ensaio de mancha de areia em laboratório na condição inicial (posição 3)

Placa	Mistura	Posição 1	Posição 2	Posição 3	Média Hs	Desvio
7b	GAP (V)	1,29	1,08	0,88	1,08	0,20
8	GAP (P)	1,04	1,08	0,99	1,04	0,05
9	GAP (P)	1,17	1,12	1,08	1,12	0,04
10	GAP (V)	1,12	1,08	0,88	1,03	0,13
13	CA (V)	0,86	0,76	0,75	0,79	0,06
14	CA (V)	0,86	0,83	0,75	0,81	0,06
17	CA (P)	1,11	0,93	1,01	1,01	0,09
18	CA (P)	0,92	1,13	0,97	1,01	0,11
19	SD (V)	1,00	0,84	0,86	0,90	0,08
20	SD (V)	0,90	0,88	0,83	0,87	0,04
23	SD (P)	1,26	1,25	1,11	1,21	0,08
24	SD(P)	1,06	1,15	1,12	1,11	0,04

 Tabela 61. Ensaio de mancha de areia em laboratório nos ciclos de simulação de tráfego (0 ciclos)

 Tabela 62. Ensaio de mancha de areia em laboratório nos ciclos de simulação de tráfego (3.000 ciclos)

Placa	Mistura	Posição 1	Posição 2	Posição 3	Média Hs	Desvio
7b	GAP (V)	1,13	1,18	1,06	1,12	0,06
8	GAP (P)	1,15	1,04	1,11	1,10	0,06
9	GAP (P)	1,15	0,98	1,18	1,10	0,11
10	GAP (V)	1,04	1,13	1,02	1,06	0,06
13	CA(V)	0,80	0,92	0,96	0,89	0,09
14	CA (V)	0,89	0,83	0,86	0,86	0,03
17	CA (P)	1,00	1,13	1,00	1,04	0,08
18	CA (P)	0,94	1,15	1,04	1,04	0,11
19	SD (V)	1,00	1,08	0,94	1,01	0,07
20	SD (V)	0,89	1,02	0,98	0,96	0,07
23	SD (P)	1,26	1,15	1,26	1,22	0,06
24	SD (P)	1,23	1,13	1,08	1,15	0,08
Placa	Mistura	Posição 1	Posição 2	Posição 3	Média Hs	Desvio
-------	------------	-----------	-----------	-----------	----------	--------
7b	GAP (V)	1,23	1,32	1,06	1,20	0,13
8	GAP (P)	1,13	1,04	1,26	1,14	0,11
9	GAP (P)	1,08	1,20	1,29	1,19	0,10
10	GAP (V)	1,20	1,11	0,96	1,09	0,12
13	CA (V)	0,84	0,81	0,89	0,85	0,04
14	CA (V)	0,80	0,80	0,80	0,80	0,00
17	CA (P)	1,00	0,94	0,94	0,96	0,03
18	CA (P)	0,91	1,08	1,00	1,00	0,09
19	SD (V)	1,00	1,08	0,98	1,02	0,06
20	SD (V)	0,92	0,94	0,96	0,94	0,02
23	SD (P)	1,11	1,35	1,11	1,19	0,14
24	SD (P)	1,18	1,26	1,15	1,20	0,05

**Tabela 63.** Ensaio de mancha de areia em laboratório nos ciclos de simulação de tráfego(10.000 ciclos)

**Tabela 64.** Ensaio de mancha de areia em laboratório nos ciclos de simulação de tráfego(30.000 ciclos)

Placa	Mistura	Posição 1	Posição 2	Posição 3	Média Hs	Desvio
7b	GAP	1,32	1,18	1,13	1,21	0,10
8	GAP (P)	1,02	0,98	1,11	1,03	0,06
9	GAP (P)	1,02	1,08	1,15	1,08	0,07
10	GAP (V)	1,06	1,18	0,98	1,07	0,10
13	CA (V)	0,77	0,80	1,00	0,86	0,12
14	CA (V)	0,81	0,80	0,89	0,83	0,05
17	CA (P)	1,02	1,00	0,89	0,97	0,07
18	CA (P)	0,92	1,06	0,92	0,97	0,08
19	SD (V)	0,98	0,98	0,92	0,96	0,03
20	SD (V)	0,86	0,94	0,94	0,91	0,05
23	SD(P)	0,91	1,13	1,16	1,07	0,14
24	SD (P)	1,16	1,20	1,12	1,16	0,04

# Ensaio de pêndulo britânico nas misturas asfálticas de laboratório

Placa	Mistura	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Medida 4	Medida 5	Média	Desvio
1	CPA	66	64	64	66	65	65	1,00
2	CPA	74	75	75	76	77	75,4	1,14
3	CPA	63	65	62	64	62	63,2	1,30
4b	CPA	67	68	69	70	70	68,8	1,30
5	CPA	75	76	76	77	74	75,6	1,14
6	CPA	68	68	67	67	70	68	1,22
7b	GAP	68	68	70	70	71	69,4	1,34
8	GAP	80	80	80			80	0,00
9	GAP	82	82	82			82	0,00
10	GAP	75	75	75			75	0,00
11	GAP	66	66	66			66	0,00
12	GAP	66	66	66			66	0,00
13	CA	71	71	71			71	0,00
14	CA	76	76	77	77	78	76,8	0,84
15	CA	72	72	72			72	0,00
16	CA	80	80	80			80	0,00
17	CA	67	69	67	69	69	68,2	1,10
18	CA	74	74	73	74	77	74,4	1,52
4	CPA	61	60	61	63	60	61	1,22
7	GAP	74	74	75	75	76	74,8	0,84
19	SD	77	77	76	75	75	76	1,00
20	SD	76	76	75	74	75	75,2	0,84
21	SD	78	76	76	75	76	76,2	1,10
22	SD	76	76	75	75	74	75,2	0,84
23	SD	75	75	75			75	0,00
24	SD	80	80	80			80	0,00

**Tabela 65.** Ensaio de pêndulo britânico em laboratório na condição inicial

Placa	Mistura	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Medida 4	Medida 5	Média	Desvio
7B	GAP	74	74	73	72	72	73	0,96
8	GAP	74	74	74			74	0,00
9	GAP	71	70	70	70		70	0,00
10	GAP	72	71	69	70	71	71	0,96
13	CA	70	70	70			70	0,00
14	CA	77	78	76	77	77	77	0,82
17	CA	67	68	69	66	69	68	1,41
18	CA	70	70	70			70	0,00
19	SEMI	70	70	70			70	0,00
20	SEMI	70	68	69	70		69	1,00
23	SEMI	70	70	70			70	0,00
24	SEMI	66	66	66			66	0,00

**Tabela 66.** Ensaio de pêndulo britânico em laboratório nos ciclos de simulação de tráfego(30.000 ciclos)



#### Ensaio de módulo dinâmico nas misturas asfálticas de laboratório

(b)

LOG (w)

**Figura 122.** Ensaio de módulo complexo na mistura asfáltica CA (VV = 8,8%): (a) módulo dinâmico e (b) ângulo de fase



**Figura 123.** Ensaio de módulo complexo na mistura asfáltica CA (VV = 7,6%): (a) módulo dinâmico e (b) ângulo de fase



**Figura 124.** Ensaio de módulo complexo na mistura asfáltica CA (VV = 8,2%): (a) módulo dinâmico e (b) ângulo de fase



**Figura 125.** Ensaio de módulo complexo na mistura asfáltica CA (VV = 4,5%): (a) módulo dinâmico e (b) ângulo de fase



**Figura 126.** Ensaio de módulo complexo na mistura asfáltica CA (VV = 5,4%): (a) módulo dinâmico e (b) ângulo de fase



**Figura 127.** Ensaio de módulo complexo na mistura asfáltica SEMI (VV = 8,4%): (a) módulo dinâmico e (b) ângulo de fase



**Figura 128.** Ensaio de módulo complexo na mistura asfáltica SEMI (VV = 8,6%): (a) módulo dinâmico e (b) ângulo de fase



**Figura 129.** Ensaio de módulo complexo na mistura asfáltica SEMI (VV = 7,3%): (a) módulo dinâmico e (b) ângulo de fase



**Figura 130.** Ensaio de módulo complexo na mistura asfáltica SEMI (VV = 7,0%): (a) módulo dinâmico e (b) ângulo de fase



**Figura 131.** Ensaio de módulo complexo na mistura asfáltica GAP (VV = 9,0%): (a) módulo dinâmico e (b) ângulo de fase



**Figura 132.** Ensaio de módulo complexo na mistura asfáltica GAP (VV = 9,2%): (a) módulo dinâmico e (b) ângulo de fase

## Ensaio de módulo de resiliência nas misturas asfálticas em laboratório

		C	Μ	TS	MA	CRO
Mistur	a	Corpo- de- prova	MR total	MR instantâneo	MR total	MR instantâneo
M021	CA	1	2858.08	2800.70	2156.07	3166.61
M021		2	4084.62	4116.18	3504 56	4870.04
M021		3	3382.24	3405.68	2463 32	35/0.38
M021		<u> </u>	4367 58	4392.21	3139.00	4480.01
M021		5	3142.07	3151.64	2627.84	3856.28
M024	CA+	6	3007.68	3008.05	3265.87	4724 14
M024	CA+	7	3169.42	3207.31	2363 72	3462.11
M024	CA+	8	4017.95	4024 88	2837.47	4124 84
M024	$CA^+$	9	4294 55	4334 76	2902 34	4139.62
M024	CA+	10	4536.91	4575.92	3226.80	4541.05
M025	CA-	11	3975.75	3977.87	3359.13	4976.75
M025	CA-	12	3047.00	3029.94	2546.25	3765.52
M025	CA-	13	4197.19	4197.22	2974.97	4429.13
M025	CA-	14	3373.59	3395.88	3166.58	4733.56
M025	CA-	15	3480.49	3527.17	2781.62	4154.40
M028	CPA	16	_	-	-	-
M028	CPA	17	_	-	-	-
M028	CPA	18	_	-	_	-
M028	CPA	19	_	-	_	-
M028	CPA	20	-	-	-	-
M022	SEMI	21	-	-	-	-
M022	SEMI	22	3165,62	3178,84	2643,87	3689,13
M022	SEMI	23	3946,98	3899,47	2736,04	3964,72
M022	SEMI	24	2931,48	2957,00	2634,31	3735,64
M022	SEMI	25	-	-	-	-
M026	SEMI +	26	3468,69	3496,25	2754,16	3811,71
M026	SEMI +	27	4163,61	4159,64	3188,97	4595,14
M026	SEMI +	28	4609,96	4651,42	3671,58	5142,44
M026	SEMI +	29	2902,78	2899,55	2354,13	3417,63
M026	SEMI +	30	3438,13	3416,43	3011,50	4422,16
M027	SEMI -	31	3107,89	3101,94	2527,31	3852,38

Tabela 67. Ensaio de módulo de resiliência em amostras extraídas de campo

M027	SEMI -	32	3354,93	3384,07	2329,14	3647,34
M027	SEMI -	33	3315,51	3323,36	2452,14	3486,47
M027	SEMI -	34	3356,17	3341,73	2790,71	4285,48
M027	SEMI -	35	3596,30	3602,24	2766,81	4247,03
M028	GAP	36	2068,97	2071,15	1954,98	2940,23
M028	GAP	37	3489,11	3513,62	2462,31	3619,52
M028	GAP	38	2388,13	2383,56	2060,20	3153,97
M028	GAP	39	2399,10	2406,30	2012,58	3142,44
M028	GAP	40	3185,44	3199,16	2351,22	3530,11

### **ENSAIOS NO TRECHO EXPERIMENTAL**

#### Ensaio de mancha de areia nas misturas asfálticas de campo

Ponto	Posição	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Medida 4	Média (mm)	Hs (mm )	Classificação
1	TRE	23,0	23,0	24,0	23,0	232,5	0,59	Média
2	EIXO	20,0	20,0	21,0	20,0	202,5	0,78	Média
3	TRI	23,0	19,0	21,0	22,0	212,5	0,70	Média
4	TRE	19,0	19,0	19,0	19,0	190,0	0,88	Grosseira
5	EIXO	20,0	18,0	20,0	18,0	190,0	0,88	Grosseira
6	TRI	23,0	22,0	23,0	22,0	225,0	0,63	Média
7	TRE	22,0	20,0	21,0	19,0	205,0	0,76	Média

Tabela 68. Ensaio de mancha de areia no trecho experimental – segmento 1 (CA): 0 meses

Tabela 69. Ensaio de mancha de areia no trecho experimental - segmento 2 (CA+): 0 meses

Ponto	Posição	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Medida 4	Média (mm)	Hs (mm )	Classificação
8	TRE	19,0	19,0	19,0	18,0	187,5	0,91	Grosseira
9	EIXO	21,0	20,0	21,0	21,0	207 <i>,</i> 5	0,74	Média
10	TRI	20,0	18,0	20,0	19,0	192,5	0,86	Grosseira
11	TRE	22,0	20,0	22,0	20,0	210,0	0,72	Média
12	EIXO	20,0	21,0	20,0	19,0	200,0	0,80	Média
13	TRI	22,0	25,0	22,0	23,0	230,0	0,60	Média

Tabela 70. Ensaio de mancha de areia no trecho experimental – segmento 3 (CA-): 0 meses

Ponto	Posição	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Medida 4	Média (mm)	Hs (mm )	Classificação
14	TRE	18,0	18,0	18,0	18,0	180,0	0,98	Grosseira
15	EIXO	21,0	19,0	21,0	19,0	200,0	0,80	Média
16	TRI	18,0	20,0	20,0	20,0	195,0	0,84	Grosseira
17	TRE	23,0	21,0	25,0	21,0	225,0	0,63	Média
18	EIXO	20,0	18,0	20,0	18,0	190,0	0,88	Grosseira
19	TRI	21,0	20,0	22,0	19,0	205,0	0,76	Média
20	TRE	21,0	20,0	21,0	21,0	207,5	0,74	Média
21	EIXO	21,0	20,0	21,0	20,0	205,0	0,76	Média

Ponto	Posição	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Medida 4	Média (mm)	Hs (mm )	Classificação
22	TRE	22,0	21,0	21,0	21,0	212,5	0,70	Média
23	EIXO	17,0	17,0	15,0	17,0	165,0	1,17	Grosseira
24	TRI	19,0	18,0	19,0	19,0	187,5	0,91	Grosseira
25	TRE	20,0	19,0	19,0	19,0	192,5	0,86	Grosseira
26	EIXO	17,0	17,0	17,0	17,0	170,0	1,10	Grosseira
27	TRI	19,0	18,0	19,0	18,0	185,0	0,93	Grosseira

Tabela 71. Ensaio de mancha de areia no trecho experimental – segmento 5 (SEMI): 0 meses

Tabela 72. Ensaio de mancha de areia no trecho experimental – segmento 6 (SEMI+): 0 meses

Ponto	Posição	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Medida 4	Média (mm)	Hs (mm )	Classificação
28	TRE	21,0	20,0	20,0	20,0	202,5	0,78	Média
29	EIXO	18,0	17,0	19,0	18,0	180,0	0,98	Grosseira
30	TRI	17,0	16,0	16,0	17,0	165,0	1,17	Grosseira
31	TRE	17,0	19,0	19,0	18,0	182,5	0,96	Grosseira
32	EIXO	20,0	20,0	20,0	20,0	200,0	0,80	Média
33	TRI	20,0	18,0	19,0	19,0	190,0	0,88	Grosseira
34	TRE	21,0	18,0	20,0	19,0	195,0	0,84	Grosseira

Tabela 73. Ensaio de mancha de areia no trecho experimental – segmento 7 (SEMI-): 0 meses

Ponto	Posição	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Medida 4	Média (mm)	Hs (mm )	Classificação
35	TRE	20,0	20,0	20,0	21,0	202,5	0,78	Média
36	EIXO	23,0	21,0	22,0	21,0	217,5	0,67	Média
37	TRI	19,0	19,0	19,0	19,0	190,0	0,88	Grosseira
38	TRE	20,0	19,0	19,0	20,0	195,0	0,84	Grosseira
39	EIXO	20,0	18,0	19,0	19,0	190,0	0,88	Grosseira
40	TRI	22,0	21,0	22,0	21,0	215,0	0,69	Média

Ponto	Posição	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Medida 4	Média (mm)	Hs (mm )	Classificação
41	TRE	16,0	16,0	16,0	16,0	160,0	1,24	Muito Grosseira
42	EIXO	17,0	17,0	17,0	16,0	167,5	1,13	Grosseira
43	TRI	17,0	17,0	16,0	17,0	167,5	1,13	Grosseira
44	TRE	19,0	16,0	18,0	18,0	177,5	1,01	Grosseira
45	EIXO	17,0	16,0	16,0	17,0	165,0	1,17	Grosseira
46	TRI	17,0	16,0	16,0	16,0	162,5	1,21	Muito Grosseira
47	TRE	19,0	17,0	18,0	18,0	180,0	0,98	Grosseira
48	EIXO	19,0	16,0	17,0	17,0	172,5	1,07	Grosseira
49	TRI	17,0	16,0	17,0	17,0	167,5	1,13	Grosseira

Tabela 74. Ensaio de mancha de areia no trecho experimental – segmento 8 (GAP): 0 meses

Ponto	Posição	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Medida 4	Média (mm)	Hs (mm )	Classificação
1	TRE	23,0	23,0	23,5	24,0	233,8	0,58	Média
2	EIXO	19,0	20,0	19,5	20,0	196,3	0,83	Grosseira
3	TRI	20,0	19,0	19,5	21,0	198,8	0,81	Grosseira
4	TRE	19,0	18,0	19,0	18,0	185,0	0,93	Grosseira
5	EIXO	20,0	21,0	21,0	20,0	205,0	0,76	Média
6	TRI	19,0	19,0	21,0	20,0	197,5	0,82	Grosseira

Tabela 75. Ensaio de mancha de areia no trecho experimental – segmento 1 (CA): 4 meses

Tabela 76. Ensaio de mancha de areia no trecho experimental – segmento 2 (CA+): 4 meses

Ponto	Posição	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Medida 4	Média (mm)	Hs (mm )	Classificação
7	TRE	19,0	21,0	20,0	19,0	197,5	0,82	Grosseira
8	EIXO	20,0	20,5	21,0	20,0	203,8	0,77	Média
9	TRI	19,0	18,0	19,0	20,0	190,0	0,88	Grosseira
10	TRE	21,0	21,0	22,0	21,5	213,8	0,70	Média
11	EIXO	20,5	20,0	20,0	20,0	201,3	0,79	Média
12	TRI	22,0	20,0	20,0	20,5	206,3	0,75	Média

Tabela 77. Ensaio de mancha de areia no trecho experimental – segmento 3 (CA-): 4 meses

Ponto	Posição	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Medida 4	Média (mm)	Hs (mm )	Classificação
13	TRE	21,0	21,0	20,5	21,0	208,8	0,7	Média
14	EIXO	20,0	20,0	20,0	20,5	201,3	0,8	Média
15	TRI	20,0	19,0	20,0	20,5	198,8	0,8	Grosseira
16	TRE	22,0	23,0	23,0	24,0	230,0	0,6	Média
17	EIXO	20,0	21,0	20,0	20,0	202,5	0,8	Média
18	TRI	20,0	20,0	22,0	22,0	210,0	0,7	Média
19	TRE	21,0	20,5	20,0	20,0	203,8	0,8	Média
20	EIXO	18,0	20,0	19,0	20,0	192,5	0,9	Grosseira

Ponto	Posição	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Medida 4	Média (mm)	Hs (mm )	Classificação
21	TRE	17,0	19,0	19,5	20,0	188,8	0,89	Grosseira
22	EIXO	19,0	18,0	20,0	20,0	192,5	0,86	Grosseira
23	TRI	19,0	19,0	18,0	20,0	190,0	0,88	Grosseira
24	TRE	19,5	19,0	19,0	20,0	193,8	0,85	Grosseira
25	EIXO	17,5	18,0	18,0	17,0	176,3	1,02	Grosseira
26	TRI	19,0	20,0	19,5	20,0	196,3	0,83	Grosseira

Tabela 78. Ensaio de mancha de areia no trecho experimental – segmento 5 (SEMI): 4 meses

Tabela 79. Ensaio de mancha de areia no trecho experimental – segmento 6 (SEMI+): 4 meses

Ponto	Posição	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Medida 4	Média (mm)	Hs (mm )	Classificação
27	TRE	18,0	19,0	19,0	19,5	188,8	0,89	Grosseira
28	EIXO	20,0	20,0	20,0	20,0	200,0	0,80	Média
29	TRI	18,0	18,0	18,0	18,0	180,0	0,98	Grosseira
30	TRE	19,0	19,0	22,0	23,0	207,5	0,74	Média
31	EIXO	20,0	20,0	20,0	20,0	200,0	0,80	Média
32	TRI	18,0	19,0	18,0	19,0	185,0	0,93	Grosseira

Tabela 80. Ensaio de mancha de areia no trecho experimental – segmento 7 (SEMI-): 4 meses

Ponto	Posição	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Medida 4	Média (mm)	Hs (mm )	Classificação
34	TRE	19,0	17,0	18,0	18,0	180,0	0,98	Grosseira
35	EIXO	22,0	18,0	20,0	21,0	202,5	0,78	Média
36	TRI	19,0	19,0	22,0	20,0	200,0	0,80	Média
37	TE	17,0	20,0	20,0	19,0	190,0	0,88	Grosseira
38	EIXO	19,0	20,0	18,0	20,0	192,5	0,86	Grosseira
39	TRI	18,0	18,0	17,0	18,0	177,5	1,01	Grosseira

Ponto	Posição	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Medida 4	Média (mm)	Hs (mm )	Classificação
40	TRE	16,0	14,0	18,0	16,0	160,0	1,24	Muito Grosseira
41	EIXO	18,0	17,0	15,0	14,0	160,0	1,24	Muito Grosseira
42	TRI	17,0	16,0	16,0	17,0	165,0	1,17	Grosseira
43	TRE	17,0	16,0	17,0	15,0	162,5	1,21	Muito Grosseira
44	EIXO	17,0	16,0	17,0	17,0	167,5	1,13	Grosseira
45	TRI	14,0	16,0	17,0	15,0	155,0	1,32	Muito Grosseira
46	TRE	18,0	16,0	16,0	14,0	160,0	1,24	Muito Grosseira
47	EIXO	18,0	15,0	15,0	14,0	155,0	1,32	Muito Grosseira
48	TRI	16,0	17,0	15,0	15,0	157,5	1,28	Muito Grosseira

Tabela 81. Ensaio de mancha de areia no trecho experimental – segmento 8 (GAP): 4 meses

Ponto	Posição	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Medida 4	Média (mm)	Hs (mm )	Classificação
1	TRE	240,0	230,0	240,0	230,0	235,0	0,58	Média
2	EIXO	200,0	190,0	220,0	210,0	205,0	0,76	Média
3	TRI	240,0	200,0	230,0	220,0	222,5	0,64	Média
4	TRE	180,0	220,0	180,0	200,0	195,0	0,84	Grosseira
5	EIXO	210,0	200,0	205,0	185,0	200,0	0,80	Média
6	TRI	195,0	180,0	190,0	200,0	191,3	0,87	Grosseira
7	TRE	165,0	180,0	180,0	190,0	178,8	1,00	Grosseira
8	EIXO	200,0	175,0	200,0	195,0	192,5	0,86	Grosseira
9	TRI	210,0	220,0	225,0	220,0	218,8	0,67	Média
10	TRE	225,0	200,0	215,0	220,0	215,0	0,69	Média
11	EIXO	215,0	190,0	200,0	205 <i>,</i> 0	202,5	0,78	Média
12	TRI	205,0	180,0	180,0	185,0	187,5	0,91	Grosseira
13	TRE	205,0	190,0	200,0	190,0	196,3	0,83	Grosseira

Tabela 82. Ensaio de mancha de areia no trecho experimental – segmento 1 (CA): 12 meses

Tabela 83. Ensaio de mancha de areia no trecho experimental – segmento 2 (CA+): 12 meses

Ponto	Posição	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Medida 4	Média (mm)	Hs (mm )	Classificação
14	EIXO	230,0	170,0	215,0	195,0	202,5	0,78	Média
15	TRI	210,0	195,0	200,0	210,0	203,8	0,77	Média
16	TRE	200,0	180,0	200,0	195,0	193,8	0,85	Grosseira
17	EIXO	210,0	205,0	205,0	205,0	206,3	0,75	Média
18	TRI	245,0	220,0	238,0	212,0	228,8	0,61	Média
19	TRE	205,0	215,0	200,0	205,0	206,3	0,75	Média
20	EIXO	240,0	230,0	240,0	255,0	241,3	0,55	Média
21	TRI	210,0	200,0	200,0	230,0	210,0	0,72	Média
22	TRE	250,0	230,0	240,0	230,0	237,5	0,56	Média
23	EIXO	225,0	220,0	220,0	215,0	220,0	0,66	Média
24	TRI	240,0	220,0	225,0	235,0	230,0	0,60	Média
25	TRE	195,0	210,0	195,0	205,0	201,3	0,79	Média

Ponto	Posição	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Medida 4	Média (mm)	Hs (mm )	Classificação
26	EIXO	215,0	215,0	215,0	215,0	215,0	0,69	Média
27	TRI	230,0	240,0	240,0	230,0	235,0	0,58	Média
28	TRE	210,0	220,0	220,0	220,0	217,5	0,67	Média
29	EIXO	220,0	230,0	225,0	230,0	226,3	0,62	Média
30	TRI	185,0	225,0	210,0	200,0	205,0	0,76	Média
31	TRE	215,0	235,0	230,0	220,0	225,0	0,63	Média
32	EIXO	240,0	215,0	240,0	230,0	231,3	0,60	Média
33	TRI	225,0	205,0	200,0	200,0	207,5	0,74	Média
34	TRE	215,0	185,0	210,0	205,0	203,8	0,77	Média
35	EIXO	240,0	210,0	242,0	237,0	232,3	0,59	Média
36	TRI	230,0	220,0	230,0	225,0	226,3	0,62	Média

Tabela 84. Ensaio de mancha de areia no trecho experimental – segmento 3 (CA-): 12 meses

Ponto	Posição	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Medida 4	Média (mm)	Hs (mm )	Classificação
37	TRE	205,00	200,00	205,00	215,00	206,25	0,75	Média
38	EIXO	215,00	250,00	230,00	220,00	228,75	0,61	Média
39	TRI	215,00	200,00	215,00	215,00	211,25	0,71	Média
40	TRE	170,00	195,00	180,00	195,00	185,00	0,93	Grosseira
41	EIXO	170,00	150,00	155,00	165,00	160,00	1,24	Muito Grosseira
42	TRI	165,00	190,00	190,00	185,00	182,50	0,96	Grosseira
43	TRE	165,00	176,00	165,00	176,00	170,5	1,09	Grosseira
44	EIXO	170,00	155,00	166,00	170,00	165,3	1,17	Grosseira
45	TRI	165,00	155,00	166,00	150,00	159,0	1,26	Muito Grosseira
46	TRE	197,00	166,00	185,00	165,00	178,3	1,00	Grosseira
47	EIXO	205,00	200,00	200,00	205,00	202,5	0,78	Média
48	TRI	175,00	150,00	165,00	160,00	162,5	1,21	Muito Grosseira
49	TRE	125,00	125,00	125,00	125,00	125,00	2,04	Muito Grosseira
50	EX EIXO	160,00	160,00	160,00	160,00	160,00	1,24	Muito Grosseira
51	TRI	180,00	155,00	165,00	155,00	163,75	1,19	Grosseira
52	TRE	165,00	155,00	170,00	175,00	166,25	1,15	Grosseira
53	EIXO	160,00	160,00	165,00	155,00	160,00	1,24	Muito Grosseira
54	TRI	155,00	155,00	155,00	155,00	155,00	1,32	Muito Grosseira
55	TRE	140,00	140,00	140,00	140,00	140,0	1,62	Muito Grosseira
56	EIXO	180,00	160,00	170,00	175,00	171,3	1,09	Grosseira
57	TRI	200,00	205,00	205,00	210,00	205,0	0,76	Média

Tabela 85. Ensaio de mancha de areia no trecho experimental – segmento 4 (CPA): 12 meses

Ponto	Posição	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Medida 4	Média (mm)	Hs (mm )	Classificação
58	TRE	210,0	205,0	220,0	210,0	211,3	0,71	Média
59	EIXO	190,0	190,0	185,0	205,0	192,5	0,86	Grosseira
60	TRI	195,0	190,0	200,0	190,0	193,8	0,85	Grosseira
61	TRE	200,0	180,0	190,0	190,0	190,0	0,88	Grosseira
62	EIXO	190,0	205,0	210,0	205,0	202,5	0,78	Média
63	TRI	200,0	220,0	220,0	210,0	212,5	0,70	Média
64	TRE	220,0	205,0	210,0	205,0	210,0	0,72	Média
65	EIXO	190,0	185,0	200,0	175,0	187,5	0,91	Grosseira
66	TRI	205,0	220,0	215,0	215,0	213,8	0,70	Média
67	TRE	205,0	235,0	220,0	225,0	221,3	0,65	Média
68	EIXO	225,0	240,0	240,0	240,0	236,3	0,57	Média
69	TRI	200,0	220,0	215,0	215,0	212,5	0,70	Média

Tabela 86. Ensaio de mancha de areia no trecho experimental - segmento 5 (SEMI): 12 meses

Tabela 87. Ensaio de mancha de areia no trecho experimental – segmento 6 (SEMI+): 12 meses

Ponto	Posição	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Medida 4	Média (mm)	Hs (mm )	Classificação
70	TRE	195,0	200,0	210,0	200,0	201,3	0,79	Média
71	EIXO	220,0	210,0	220,0	225,0	218,8	0,67	Média
72	TRI	195,0	220,0	210,0	205,0	207,5	0,74	Média
73	TRE	210,0	235,0	220,0	210,0	218,8	0,67	Média
74	EIXO	215,0	220,0	210,0	215,0	215,0	0,69	Média
75	TRI	200,0	200,0	195,0	200,0	198,8	0,81	Grosseira
76	TRE	200,0	190,0	195,0	200,0	196,3	0,83	Grosseira
77	EIXO	200,0	220,0	220,0	215,0	213,8	0,70	Média
78	TRI	175,0	185,0	180,0	185,0	181,3	0,97	Grosseira
79	TRE	240,0	235,0	220,0	245,0	235,0	0,58	Média
80	EIXO	245,0	240,0	240,0	255,0	245,0	0,53	Média
81	TRI	215,0	210,0	205,0	210,0	210,0	0,72	Média

Ponto	Posição	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Medida 4	Média (mm)	Hs (mm )	Classificação
82	TRE	205,0	210,0	200,0	195,0	202,5	0,78	Média
83	EIXO	225,0	225,0	230,0	225,0	226,3	0,62	Média
84	TRI	265,0	280,0	280,0	290,0	278,8	0,41	Média
85	TRE	230,0	240,0	240,0	240,0	237,5	0,56	Média
86	EIXO	240,0	250,0	225,0	250,0	241,3	0,55	Média
87	TRI	200,0	225,0	210,0	215,0	212,5	0,70	Média
88	TRE	250,0	250,0	245,0	245,0	247,5	0,52	Média
89	EIXO	265,0	260,0	250,0	260,0	258,8	0,48	Média
90	TRI	215,0	210,0	215,0	220,0	215,0	0,69	Média
91	TRE	205,0	205,0	195,0	205,0	202,5	0,78	Média
92	EIXO	265,0	260,0	245,0	275,0	261,3	0,47	Média
93	TRI	260,0	265,0	250,0	250,0	256,3	0,48	Média

Tabela 88. Ensaio de mancha de areia no trecho experimental - segmento 7 (SEMI-): 12 meses

Tabela 89. Ensaio de mancha de areia no trecho experimental - segmento 8 (GAP): 12 meses

Ponto	Posição	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Medida 4	Média (mm)	Hs (mm )	Classificação
94	TRE	195,0	200,0	185,0	190,0	192,5	0,86	Grosseira
95	EIXO	210,0	200,0	215,0	215,0	210,0	0,72	Média
96	TRI	180,0	190,0	195,0	180,0	186,3	0,92	Grosseira
97	TRE	200,0	195,0	195,0	190,0	195,0	0,84	Grosseira
98	EIXO	200,0	200,0	190,0	195,0	196,3	0,83	Grosseira
99	TRI	195,0	190,0	180,0	190,0	188,8	0,89	Grosseira
100	TRE	220,0	180,0	220,0	190,0	202,5	0,78	Média
101	EIXO	245,0	215,0	225,0	225,0	227,5	0,62	Média
102	TRI	190,0	210,0	205,0	190,0	198,8	0,81	Grosseira
103	TRE	195,0	195,0	200,0	200,0	197,5	0,82	Grosseira
104	EIXO	200,0	220,0	220,0	215,0	213,8	0,70	Média
105	TRI	190,0	210,0	185,0	195,0	195,0	0,84	Grosseira
106	TRE	190,0	200,0	195,0	190,0	193,8	0,85	Grosseira
107	EIXO	190,0	195,0	205,0	185,0	193,8	0,85	Grosseira
108	TRI	190,0	195,0	190,0	190,0	191,3	0,87	Grosseira
109	TRE	205,0	205,0	225,0	205,0	210,0	0,72	Média

### Ensaio de pêndulo britânico nas misturas asfálticas de campo

Ponto	Posição	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Medida 4	VRD	Classificação
1	TRE	58	56	56	56	57	Rugosa
2	EIXO	48	48	49	50	49	Medianamente Rugosa
3	TRI	55	55	55	55	55	Rugosa
4	TRE	52	52	54	54	53	Medianamente Rugosa
5	EIXO	51	51	50	50	51	Medianamente Rugosa
6	TRI	50	50	50	50	50	Medianamente Rugosa
7	TRE	60	60	58	60	60	Rugosa

Tabela 90. Ensaio de pêndulo britânico no trecho experimental – segmento 1 (CA): 0 meses

Tabela 91. Ensaio de pêndulo britânico no trecho experimental – segmento 2 (CA+): 0 meses

Ponto	Posição	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Medida 4	VRD	Classificação
1	TRE	55	55	54	54	55	Rugosa
2	EIXO	58	58	60	60	59	Rugosa
3	TRI	60	59	60	59	60	Rugosa
4	TRE	56	56	56	56	56	Rugosa
5	EIXO	58	58	57	57	58	Rugosa
6	трі	E 2	E 1	E 1	50	<b>E</b> 1	Medianamente
6	IN	52	51	51	50	51	Rugosa

Ponto	Posição	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Medida 4	VRD	Classificação
1	TRE	50	49	49	51	50	Medianamente Bugosa
2	EIXO	45	44	44	44	44	Insuficientemente Rugosa
3	TRI	45	45	46	46	46	Insuficientemente Rugosa
4	TRE	44	45	43	44	44	Insuficientemente Rugosa
5	EIXO	62	60	62	60	61	Rugosa
6	TRI	46	45	46	45	46	Insuficientemente Rugosa
7	TRE	42	42	42	42	42	Insuficientemente Rugosa
8	EIXO	57	55	57	55	56	Rugosa

Tabela 92. Ensaio de pêndulo britânico no trecho experimental – segmento 3 (CA-): 0 meses

Tabela 93. Ensaio de pêndulo britânico no trecho experimental - segmento 4 (CPA): 0 meses

Ponto	Posição	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Medida 4	VRD	Classificação
1	TRF	50	50	50	50	50	Medianamente
-		50	50	50	50	50	Rugosa
2	FIXO	10	18	18	18	18	Medianamente
2	LINO	45	40	40	<sup>4</sup>	40	Rugosa
2	трі	17	15	15	15	16	Insuficientemente
5	INI	47	45	40	40	40	Rugosa
л	TDE	15	16	16	15	46	Insuficientemente
4	INL	45	40	40	40	40	Rugosa
5	EIXO	55	55	55	55	55	Rugosa
6	трі	17	16	16	16	16	Insuficientemente
0	INI	47	40	40	40	40	Rugosa
7	TDE	E /I	55	E /I	E /I	E /	Medianamente
/	INE	54	55	54	54	54	Rugosa
8	EIXO	55	55	55	55	55	Rugosa
0	трі	50	50	50	50	50	Medianamente
9	INI	50	50	50	50		Rugosa

Ponto	Posição	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Medida 4	VRD	Classificação
1	TRE	10	/18	17	10	18	Medianamente
-	INL	45	40	47	49	40	Rugosa
2	EIXO	60	59	59	59	59	Rugosa
2	трі	E0	50	E0	E0	E 0	Medianamente
5	INI	50	50	50	50	50	Rugosa
4	TDE	ΓΛ	E 2	E 2	E 2	БЭ	Medianamente
4	IKE	54	55	55	55	55	Rugosa
5	EIXO	56	56	56	56	56	Rugosa
G	трі	16	45	1.1	16	45	Insuficientemente
0	IKI	40	40	44	40	45	Rugosa

Tabela 94. Ensaio de pêndulo britânico no trecho experimental – segmento 5 (SEMI): 0 meses

Tabela 95. Ensaio de pêndulo britânico no trecho experimental - segmento 6 (SEMI+): 0 meses

Ponto	Posição	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Medida 4	VRD	Classificação
1	TRE	45	44	46	46	45	Insuficientemente
							Rugosa
2	FIXO	17	18	10	50	19	Medianamente
2	LINO	77	40	45	50	75	Rugosa
2	трі	FO	FO	10	10	40	Medianamente
5	IKI	50	50	48	48	49	Rugosa
л	TDE	<b>E</b> 1	10	10	50	50	Medianamente
4	INE	51	49	40	50	50	Rugosa
5	EIXO	55	54	55	54	55	Rugosa
6	трі	10	10	10	10	10	Medianamente
0	INI	40	40	40	40	40	Rugosa
7	TDE	10	10	10	10	10	Medianamente
7 TRE	40	40	40	40	48	Rugosa	

Ponto	Posição	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Medida 4	VRD	Classificação	
1	TDE	11	45	16	16	45	Insuficientemente	
1	INL	44	45	40	40	45	Rugosa	
2	EIXO	59	59	60	60	60	Rugosa	
2	трі	16	16	16	16	16	Insuficientemente	
5	IKI	40	40	40	40	46	Rugosa	
4	тог	45	45	45	45	45	Insuficientemente	
4	IKE	45	45	45	45	45	Rugosa	
5	EIXO	55	55	55	54	55	Rugosa	
C	то	45	45	45	45	45	Insuficientemente	
D	IKI	45	45	45	45	45	Rugosa	
1	TRF	TDE		45	16	16	45	Insuficientemente
1 TRE	44	40	40	40	45	Rugosa		

Tabela 96. Ensaio de pêndulo britânico no trecho experimental - segmento 7 (SEMI-): 0 meses

Tabela 97. Ensaio de pêndulo britânico no trecho experimental - segmento 8 (GAP): 0 meses

Ponto	Posição	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Medida 4	VRD	Classificação
1	TRF	52	53	51	51	52	Medianamente
1		52	55	51	51	52	Rugosa
2	EIXO	57	57	57	57	57	Rugosa
2	трі	15	15	16	15	15	Insuficientemente
ר		45	40	40	40	45	Rugosa
л	TDE	E 2	E1	<b>E</b> 1	E 2	ΕĴ	Medianamente
4	INE	55	51	51	55	52	Rugosa
5	EIXO	60	60	60	60	60	Rugosa
6	трі	50	FO	E0	FO	50	Medianamente
0		50	50	50	50	50	Rugosa
7	TDE	<b>E</b> 1	E 1	<b>E</b> 1	<b>E</b> 1	E 1	Medianamente
/	IKE	51	51	51	51	51	Rugosa
8	EIXO	60	60	60	60	60	Rugosa
0	трі	FO	FO	FO	FO	FO	Medianamente
Э	IKI	50	50	50	50	50	Rugosa

Ponto	Posição	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Medida 4	VRD	Classificação
1	TF	47	48	48	47	48	Medianamente
-		-77	40	40	77	10	Rugosa
2	E	54	52	52	56	54	Medianamente
2	L	54	כר	55	50	54	Rugosa
2	ті	FO	FO	E 1	E 2	Γ1	Medianamente
5	11	50	50	51	52	51	Rugosa
4	тс	E 1	E 1	E 1	<b>E</b> 1	E 1	Medianamente
4	IC	51	51	51	51	51	Rugosa
E	с	FO	40	E 1	FO	FO	Medianamente
5	E	50	49	51	50	50	Rugosa
G	ті	ΕΛ	E A	ΕΛ	ΕΛ	<b>F</b> 4	Medianamente
0	11	54	54	54	54	54	Rugosa

Tabela 98. Ensaio de pêndulo britânico no trecho experimental - segmento 1 (CA): 4 meses

Tabela 99. Ensaio de pêndulo britânico no trecho experimental – segmento 2 (CA+): 4 meses

Ponto	Posição	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Medida 4	VRD	Classificação
1	TE	60	61	62	61	61	Rugosa
2	E	54	54	54	54	54	Medianamente
-	-	51	51	51	51		Rugosa
3	TI	55	55	55	55	55	Rugosa
Л	TE	15	11	16	11	45	Insuficientemente
4	16	45	44	40		40	Rugosa
5	E	25	25	25	25		Perigosa
6	ті	15	11	11	/12	44	Insuficientemente
0	11	45	44	44	45	44	Rugosa

Tabela 100. Ensaio	de pêndulo britânico	no trecho experimental	– segmento 3	(CA-): 4 meses
--------------------	----------------------	------------------------	--------------	----------------

Ponto	Posição	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Medida 4	VRD	Classificação
1	TRE	31	31	31	31	31	Muito lisa
2	EIXO	39	39	39	39	39	Lisa
2	трі	11	11	15	16	45	Insuficientemente
5	INI	44	44	45	40	45	Rugosa
л	TRE	10	12	13	13	10	Insuficientemente
4	INL	40	42	43	45	42	Rugosa
E	EIVO	12	40	41	40	41	Insuficientemente
5	EIAU	42	42	41	40	41	Rugosa
6	TRI	35	35	36	37	36	Lisa
7	TRE	30	30	29	30	30	Muito lisa
8	EIXO	40	39	39	39	39	Lisa

Ponto	Posição	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Medida 4	VRD	Classificação
1	TRE	36	36	36	36	36	Lisa
2	EIXO	39	39	39	39	39	Lisa
3	TRI	35	35	35	35	35	Lisa
4	TRE	39	39	39	39	39	Lisa
5	EIXO	40	40	39	38	39	Lisa
6	TRI	37	36	37	35	36	Lisa
7	TRF	44	44	44	44	44	Insuficientemente
,							Rugosa
Q	FIXO	15	16	16	15	46	Insuficientemente
0	LINU	45	40	40	45	40	Rugosa
9	TRI	37	36	36	37	37	Lisa

Tabela 101. Ensaio de pêndulo britânico no trecho experimental - segmento 4 (CPA): 4 meses

Tabela 102. Ensaio de pêndulo britânico no trecho experimental – segmento 5 (SEMI): 4 meses

Ponto	Posição	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Medida 4	VRD	Classificação
1	TRF	40	40	41	42	41	Insuficientemente
							Rugosa
2	FIXO	50	51	50	50	50	Medianamente
2	LINO	50	51	50	50	50	Rugosa
2	трі	11	/12	/12	11	11	Insuficientemente
5		44	43	43	44	44	Rugosa
4	TDE	15	15	15	15	15	Insuficientemente
4	INC	45	45	45	45	45	Rugosa
E	EIVO	50	FO	FO	50	EO	Medianamente
5	EIXU	50	50	50	50	50	Rugosa
G	трі	45	45	45	45	45	Insuficientemente
0	IRI	45	40	40	45	45	Rugosa

Ponto	Posição	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Medida 4	VRD	Classificação
1	TRE	45	45	45	46	45	Insuficientemente Rugosa
2	EIXO	42	42	43	43	43	Insuficientemente Rugosa
3	TRI	37	37	37	37	37	Lisa
4	TRE	43	44	45	43	44	Insuficientemente Rugosa
5	EIXO	52	53	53	54	53	Medianamente Rugosa
6	TRI	46	47	47	48	47	Medianamente Rugosa

**Tabela 103.** Ensaio de pêndulo britânico no trecho experimental – segmento 6 (SEMI+): 4 meses

**Tabela 104.** Ensaio de pêndulo britânico no trecho experimental – segmento 7 (SEMI-): 4 meses

Ponto	Posição	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Medida 4	VRD	Classificação
1	TRF	45	46	17	17	46	Insuficientemente
1	INL	45	40	47	47	40	Rugosa
2	EIXO	55	56	55	55	55	Rugosa
2	трі	50	FO	10	10	40	Medianamente
5	INI	50	50	40	40	49	Rugosa
4	TRE	55	56	55	57	56	Rugosa
E	EIVO	10	10	10	40	40	Insuficientemente
5	EIAU	42	42	42	42	42	Rugosa
G	трі	45	45	45	45	45	Insuficientemente
0	IKI	45	40	40	40	45	Rugosa

Ponto	Posição	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Medida 4	VRD	Classificação
1	TRE	34	35	35	34	35	Lisa
2	EIXO	41	42	41	41	41	Insuficientemente Rugosa
3	TRI	36	35	36	34	35	Lisa
4	TRE	35	35	36	37	36	Lisa
5	EIXO	45	45	44	42	44	Insuficientemente Rugosa
6	TRI	42	42	42	42	42	Insuficientemente Rugosa
7	TRE	34	32	32	33	33	Lisa
8	EIXO	41	41	39	40	40	Insuficientemente Rugosa
9	TRI	37	37	36	38	37	Lisa

Tabela 105. Ensaio de pêndulo britânico no trecho experimental - segmento 8 (GAP): 4 meses

Tabela 106. Ensaio de pêndulo britânico no trecho experimental – segmento 1 (CA): 12 meses

Ponto	Posição	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Medida 4	VRD	Classificação
1	TRE	60	60	58	57	59	Rugosa
2	EIXO	57	56	56	55	56	Rugosa
3	TRI	50	50	48	49	49	Medianamente Rugosa
4	TRE	52	52	51	54	52	Medianamente Rugosa
5	EIXO	48	48	48		48	Medianamente Rugosa
6	TRI	47	46	47	47	47	Medianamente Rugosa
7	TRE	45	45	45		45	Insuficientemente Rugosa
8	EIXO	47	47	47		47	Medianamente Rugosa
9	TRI	45	45	45		45	Insuficientemente Rugosa
10	TRE	47	46	46	45	46	Insuficientemente Rugosa
11	EIXO	50	49	50	48	49	Medianamente Rugosa
12	TRI	40	40	40		40	Insuficientemente Rugosa

Ponto	Posição	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Medida 4	VRD	Classificação
1	TE	40	40	40		40	Insuficientemente Rugosa
2	EX	50	50	49	51	50	Medianamente Rugosa
3	TI	40	41	41	42	41	Insuficientemente Rugosa
4	TE	45	42	45	45	44	Insuficientemente Rugosa
5	EX	42	40	41	40	41	Insuficientemente Rugosa
6	TI	40	40	41	40	40	Insuficientemente Rugosa
7	TE	46	45	45	46	46	Insuficientemente Rugosa
8	EX	40	40	39	42	40	Insuficientemente Rugosa
9	TI	40	38	41	40	40	Insuficientemente Rugosa
10	TE	35	34	34	35	35	Lisa
11	EX	35	35	37	35	36	Lisa
12	TI	32	32	32		32	Lisa

Tabela 107. Ensaio de pêndulo britânico no trecho experimental – segmento 2 (CA+): 12 meses
Ponto	Posição	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Medida 4	VRD	Classificação
1	TRE	51	51	50	49	50	Medianamente Rugosa
2	EIXO	50	50	50		50	Medianamente Rugosa
3	TRI	41	41	40	41	41	Insuficientemente Rugosa
4	TRE	46	45	45	47	46	Insuficientemente Rugosa
5	EIXO	47	48	47	47	47	Medianamente Rugosa
6	TRI	47	46	45	45	46	Insuficientemente Rugosa
7	TRE	47	47	45	47	47	Medianamente Rugosa
8	EIXO	45	44	45	44	45	Insuficientemente Rugosa
9	TRI	47	46	45	45	46	Insuficientemente Rugosa
10	TRE	45	45	46	45	45	Insuficientemente Rugosa
11	EIXO	51	51	53	51	52	Medianamente Rugosa
12	TRI	40	41	40	41	41	Insuficientemente Rugosa

Tabela 108. Ensaio de pêndulo britânico no trecho experimental – segmento 3 (CA-): 12 meses

Ponto	Posição	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Medida 4	VRD	Classificação
1	TE	43	42	43	41	42	Insuficientemente Rugosa
2	EX	42	41	41	41	41	Insuficientemente Rugosa
3	TI	40	37	38	38	38	Lisa
4	TE	46	45	45	47	46	Insuficientemente Rugosa
5	EX	55	54	52	54	54	Medianamente Rugosa
6	TI	40	41	40	40	40	Insuficientemente Rugosa
7	TE	45	45	45		45	Insuficientemente Rugosa
8	EX	42	40	40	40	41	Insuficientemente Rugosa
9	TI	42	42	42		42	Insuficientemente Rugosa
10	TE	40	42	40	40	41	Insuficientemente Rugosa
11	EX	45	45	45		45	Insuficientemente Rugosa
12	TI	45	45	46	45	45	Insuficientemente Rugosa
13	TE	60	60	60		60	Rugosa
14	EX	58	56	56	57	57	Rugosa
15	TI	50	50	50		50	Medianamente Rugosa
16	TE	48	50	47	47	48	Medianamente Rugosa
17	EX	50	51	50	51	51	Medianamente Rugosa
18	TI	50	49	49	49	49	Medianamente Rugosa
19	TE	53	50	50	51	51	Medianamente Rugosa
20	EX	50	50	50		50	Medianamente Rugosa

Tabela 109. Ensaio de pêndulo britânico no trecho experimental – segmento 4 (CPA): 12 meses

Ponto	Posição	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Medida 4	VRD	Classificação
1	TI	40	40	40		40	Insuficientemente Rugosa
2	TE	45	45	45		45	Insuficientemente Rugosa
3	EX	46	45	45	45	45	Insuficientemente Rugosa
4	TI	41	42	41	42	42	Insuficientemente Rugosa
5	TE	45	45	45		45	Insuficientemente Rugosa
6	EX	47	45	45	45	46	Insuficientemente Rugosa
7	TI	41	41	41		41	Insuficientemente Rugosa
8	TE	45	44	44	44	44	Insuficientemente Rugosa
9	EX	49	47	47	48	48	Medianamente Rugosa
10	TI	41	41	40	40	41	Insuficientemente Rugosa
11	TE	44	43	43	43	43	Insuficientemente Rugosa
12	EX	49	48	48	48	48	Medianamente Rugosa

**Tabela 110.** Ensaio de pêndulo britânico no trecho experimental – segmento 5 (SEMI): 12 meses

Ponto	Posição	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Medida 4	VRD	Classificação
1	TI	45	45	43	44	44	Insuficientemente Rugosa
2	TE	41	41	41		41	Insuficientemente Rugosa
3	EX	50	50	50		50	Medianamente Rugosa
4	TI	41	41	41		41	Insuficientemente Rugosa
5	TE	45	44	45	43	44	Insuficientemente Rugosa
6	EX	47	45	45	45	46	Insuficientemente Rugosa
7	TI	40	40	40		40	Insuficientemente Rugosa
8	TE	41	41	40	41	41	Insuficientemente Rugosa
9	EX	47	45	46	47	46	Insuficientemente Rugosa
10	TI	47	47	47		47	Medianamente Rugosa
11	TE	43	41	41	43	42	Insuficientemente Rugosa
12	EX	50	50	51	51	51	Medianamente Rugosa

**Tabela 111.** Ensaio de pêndulo britânico no trecho experimental – segmento 6 (SEMI+): 12 meses

Ponto	Posição	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Medida 4	VRD	Classificação
1	TRE	45	47	45	45	46	Insuficientemente Rugosa
2	EIXO	55	55	52	52	54	Medianamente Rugosa
3	TRI	50	50	50		50	Medianamente Rugosa
4	TRE	44	44	43	43	44	Insuficientemente Rugosa
5	EIXO	45	43	43	45	44	Insuficientemente Rugosa
6	TRI	35	35	37	36	36	Lisa
7	TRE	38	40	40	40	40	Insuficientemente Rugosa
8	EIXO	51	50	50	59	53	Medianamente Rugosa
9	TRI	40	39	40	37	39	Lisa
10	TRE	30	31	31	31	31	Muito lisa
11	EIXO	50	50	50		50	Medianamente Rugosa

**Tabela 112.** Ensaio de pêndulo britânico no trecho experimental – segmento 7 (SEMI-): 12 meses

Ponto	Posição	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Medida 4	VRD	Classificação
1	TI	40	40	40		40	Insuficientemente Rugosa
2	TE	45	45	42	40	43	Insuficientemente Rugosa
3	EX	50	50	50		50	Medianamente Rugosa
4	TI	41	41	41		41	Insuficientemente Rugosa
5	TE	45	47	47	46	46	Insuficientemente Rugosa
6	EX	60	58	58	59	59	Rugosa
7	TI	47	47	46	46	47	Medianamente Rugosa
8	TE	47	47	47		47	Medianamente Rugosa
9	EX	51	51	51		51	Medianamente Rugosa
10	TI	50	47	47	49	48	Medianamente Rugosa
11	TE	50	50	50		50	Medianamente Rugosa
12	EX	56	55	55	55	55	Rugosa
13	TI	45	45	45		45	Insuficientemente Rugosa
14	TE	45	45	44	45	45	Insuficientemente Rugosa
15	EX	51	50	51	51	51	Medianamente Rugosa
16	TI	45	45	46	45	45	Insuficientemente Rugosa

Tabela 113. Ensaio de pêndulo britânico no trecho experimental – segmento 8 (GAP): 12 meses

## Ensaio de afundamento em trilha de roda nas misturas asfálticas de campo

Lagal	ATR (mm)				
Local	TRE	TRI			
km511+000	0	0			
km511+020	0	0			
km511+040	0	0			
km511+060	1	0			
km511+080	0	0			
km511+100	0	0			
km511+120	0	0			

**Tabela 114.** Ensaio de afundamento em trilha de roda com treliça no trecho experimental – segmento 1 (CA): 4 meses

Tabela 115. Ensaio de afundamento em trilha de roda com treliça no trecho ex	xperimental –
segmento 2 (CA+): 4 meses	

Local	ATR (mm)				
Local	TRE	TRI			
km511+140	0	0			
km511+160	4	0			
km511+180	1	0			
km511+200	1	0			
km511+220	0	0			
km511+240	1	0			

**Tabela 116.** Ensaio de afundamento em trilha de roda com treliça no trecho experimental – segmento 3 (CA-): 4 meses

Lacal	ATR (mm)				
Local	TRE	TRI			
km511+260	0	0			
km511+280	1	0			
km511+300	8	8			
km511+320	0	0			
km511+340	0	0			
km511+360	0	0			

Logal	ATR (mm)				
Local	TRE	TRI			
km511+380	1	0			
km511+400	0	0			
km511+420	0	0			
km511+440	2	2			
km511+460	0	0			
km511+480	2	0			
km511+500	0	0			
km511+520	0	0			
km511+540	0	0			

**Tabela 117.** Ensaio de afundamento em trilha de roda com treliça no trecho experimental – segmento 4 (CPA): 4 meses

Tabela 118.	Ensaio de afunda	mento em trilh	a de roda con	n treliça no t	recho expe	rimental –
		segmento 5 (S	SEMI): 4 mes	es		

T I	ATR (mm)	
Local	TRE	TRI
km511+560	0	0
km511+580	11	2
km511+600	1	0
km511+620	4	0
km511+640	2	0
km511+660	0	0
km511+680	1	0

**Tabela 119.** Ensaio de afundamento em trilha de roda com treliça no trecho experimental – segmento 6 (SEMI+): 4 meses

Lasal	ATR (mm)	
Local	TRE	TRI
km511+700	3	0
km511+720	3	0
km511+740	0	0
km511+760	0	0
km511+780	0	0
km511+800	0	0

Lagal	ATR (mm)	
Local	TRE	TRI
km511+820	0	0
km511+840	1	0
km511+860	1	0
km511+880	1	0
km511+900	0	2
km511+920	0	0

**Tabela 120.** Ensaio de afundamento em trilha de roda com treliça no trecho experimental – segmento 7 (SEMI-): 4 meses

Tabela 121. Ensaio de afundamento em trilha de roda com treliça no trecho experimental -
segmento 8 (GAP): 4 meses

Local	ATR (mm)	
	TRE	TRI
km511+940	4	0
km511+960	0	0
km511+980	0	0
km512+000	1	0
km512+020	1	0
km512+040	2	0
km512+060	0	0
km512+080	0	0
km512+100	0	0
km512+120	1	0
km512+140	1	0

Local	ATR (mm)	
	TRE	TRI
km511+000	0	0
km511+010	0	0
km511+020	0	0
km511+030	2	0
km511+040	1	0
km511+050	0	0
km511+060	1	1
km511+070	2	1
km511+080	0	0
km511+090	3	2
km511+100	1	0
km511+110	2	0

**Tabela 122.** Ensaio de afundamento em trilha de roda com treliça no trecho experimental – segmento 1 (CA): 12 meses

**Tabela 123.** Ensaio de afundamento em trilha de roda com treliça no trecho experimental – segmento 2 (CA+): 12 meses

Local	ATR (mm)	
	TRE	TRI
km511+120	2	0
km511+130	2	0
km511+140	2	0
km511+150	2	0
km511+160	2	0
km511+170	5	0
km511+180	2	0
km511+190	0	0
km511+200	1	1
km511+210	1	0
km511+220	1	0
km511+230	2	0

Local	ATR (mm)	
	TRE	TRI
km511+240	3	0
km511+250	10	0
km511+260	1	1
km511+270	3	2
km511+280	32	5
km511+290	0	0
km511+300	3	0
km511+310	3	0
km511+320	2	2
km511+330	3	4
km511+340	2	2
km511+350	2	2

**Tabela 124.** Ensaio de afundamento em trilha de roda com treliça no trecho experimental – segmento 3 (CA-): 12 meses

Local	ATR (mm)	
	TRE	TRI
km511+360	2	1
km511+370	20	0
km511+380	2	0
km511+390	2	0
km511+400	1	0
km511+410	0	4
km511+420	1	3
km511+430	0	0
km511+440	0	0
km511+450	0	0
km511+460	5	0
km511+470	3	3
km511+480	3	3
km511+490	2	1
km511+500	1	0
km511+510	35	0
km511+520	1	0
km511+530	0	0
km511+540	3	0
km511+550	5	0

**Tabela 125.** Ensaio de afundamento em trilha de roda com treliça no trecho experimental – segmento 4 (CPA): 12 meses

Local	ATR (mm)	
	TRE	TRI
km511+560	5	0
km511+570	5	0
km511+580	1	0
km511+590	0	0
km511+600	18	0
km511+610	3	0
km511+620	0	0
km511+630	0	0
km511+640	5	0
km511+650	8	0
km511+660	0	0
km511+670	2	0

**Tabela 126.** Ensaio de afundamento em trilha de roda com treliça no trecho experimental – segmento 5 (SEMI): 12 meses

**Tabela 127.** Ensaio de afundamento em trilha de roda com treliça no trecho experimental – segmento 6 (SEMI+): 12 meses

Local	ATR	R (mm)
	TRE	TRI
km511+680	0	0
km511+690	2	0
km511+700	2	0
km511+710	1	0
km511+720	2	0
km511+730	2	0
km511+740	0	0
km511+750	0	0
km511+760	1	0
km511+770	6	0
4m511+780 km5	4	0
km511+790	0	0

Local	ATR (mm)	
	TRE	TRI
km511+800	5	0
km511+810	1	0
km511+820	5	1
km511+830	5	0
km511+840	4	0
km511+850	6	0
km511+860	4	0
km511+870	3	0
km511+880	5	0
km511+890	2	0
km511+900	43	4
km511+910	6	0

**Tabela 128.** Ensaio de afundamento em trilha de roda com treliça no trecho experimental – segmento 7 (SEMI-): 12 meses

**Tabela 129.** Ensaio de afundamento em trilha de roda com treliça no trecho experimental – segmento 8 (GAP): 12 meses

Less	ATR	R (mm)
Local	TRE	TRI
km511+920	4	1
km511+930	17	0
km511+940	2	0
km511+950	4	0
km511+960	4	0
km511+970	2	0
km511+980	3	1
km511+990	2	0
km512+000	4	9
km512+010	2	0
km512+020	4	4
km512+030	4	5
km512+040	4	0
km512+050	1	4
km512+060	1	1
km512+070	9	0
km512+080	3	0

## Ensaio de área trincada nas misturas asfálticas de campo

Ponto	TRE	Área	TRI	Área	EIXO	Área	Área total
1							0

Tabela 130. Ensaio visual para obtenção de área trincada – segmento 1 (CA): 4 meses

Tabela 131. Ensaio visual para obtenção de área trincada – segmento 2 (CA+): 4 meses

Ponto	TRE	Área	T	RI	Área	EIX	ко	Área	Área total
2			105	100	10500				10500
3			50	65	3250				3250

Tabela 132. Ensaio visual para obtenção de área trincada – segmento 3 (CA-): 4 meses

Ponto	TF	RE	Área	т	RI	Área	ED	хо	Área	Área total
4	00	F0	45.00	240	100	24000				
4	90	50	4500	240	100	24000				28500
5	50	60	3000							3000
6	50	15	750							750
7	100	50	5000							5000
8	60	50	3000							3000
9	70	45	3150							3150
10	150	80	12000							12000
11	50	45	2250							2250
12	60	60	3600							3600

Tabela 133. Ensaio visual para obtenção de área trincada – segmento 4 (CPA): 4 meses

Ponto	т	RE	Área	т	RI	Área	ED	kO	Área	Área
				-						total
13	120	110	13200	50	50	2500	70	40	2800	18500
14	105	60	6300	70	60	4200	30	20	600	11100
15	70	60	4200	40	50	2000				6200
16	260	60	15600	50	60	3000				18600
17	60	40	2400	40	30	1200				3600
18	80	40	3200	40	60	2400				5600

Ponto	Т	RE	Área	т	RI	Área	ED	ко	Área	Área total
19	450	110	49500			0	70	40	2800	52300
20	100	60	6000	170	230	39100			0	45100
21	340	60	20400	80	60	4800				25200
22	290	50	14500	100	70	7000				21500
23	30	15	450	70	80	5600				6050
24	30	20	600	140	70	9800				10400
25	170	150	25500							25500
26	280	140	39200							39200
27	170	100	17000							17000
28	80	80	6400							6400
29	50	15	750							750

Tabela 134. Ensaio visual para obtenção de área trincada – segmento 5 (SEMI): 4 meses

Tabela 135. Ensaio visual para obtenção de área trincada - segmento 6 (SEMI+): 4 meses

Ponto	TI	RE	Área	T	RI	Área	EI)	0	Área	Área total
30	40	150	6000	70	50	3500				9500
31	180	50	9000	90	80	7200				16200

Tabela 136. Ensaio visual para obtenção de área trincada – segmento 7 (SEMI-): 4 meses

Ponto	TF	RE	Área	TI	RI	Área	EI	хо	Área	Área total
32	60	60	3600							3600
33	180	50	9000							9000
34	90	50	4500							4500

Tabela 137. Ensaio visual para obtenção de área trincada - segmento 8 (GAP): 4 meses

Ponto	TI	RE	Área	TI	RI	Área	EIX	ко	Área	Área total
35	80	60	4800							4800

Ponto	Dimensões	Área	Área total
1	80	150	12000
2	120	150	18000

Tabela 138. Ensaio visual para obtenção de área trincada - segmento 1 (CA): 12 meses

Tabela 139. Ensaio visual para obtenção de área trincada - segmento 2 (CA+): 12 meses

Ponto	Dimensões	Área	Área total
3	1000	140	140000
4	100	100	10000

Tabela 140. Ensaio visual para obtenção de área trincada - segmento 3 (CA-): 12 meses

Donto	Dimonsãos	Áraa	Área
Ponto	Dimensoes	Area	total
5	620	150	93000
6	500	210	105000
7	340	160	54400

Tabela 141. Ensaio visual para obtenção de área trincada - segmento 4 (CPA): 12 meses

Ponto	Dimensões	Área	Área total		
8	720	210	151200		
9	200	100	20000		

Tabela 142. Ensaio visual para obtenção de área trincada - segmento 5 (SEMI): 12 meses

Donto	Dimonsãos	Áraa	Área
Ponto	Dimensoes	Area	total
10	260	100	26000
11	300	100	30000
12	370	200	74000
13	400	170	68000
14	520	150	78000
15	300	150	45000

Ponto	Dimensões	Área	Área total	
16	530	180	95400	
17	200	100	20000	
18	210	190	39900	
19	340	160	54400	
20	240	160	38400	
21	200	110	22000	

Tabela 143. Ensaio visual para obtenção de área trincada - segmento 6 (SEMI+): 12 meses

Tabela 144. Ensaio visual para obtenção de área trincada – segmento 7 (SEMI-): 12 meses

Ponto	Dimensões	Área	Área total
22	570	360	205200
23	140	190	26600
24	200	170	34000

Tabela 145. Ensaio visual para obtenção de área trincada - segmento 8 (GAP): 12 meses

Ponto	Dimensões	Área	Área total	
25	410	230	94300	

## Ensaio de irregularidade longitudinal nas misturas asfálticas de campo

Sontido	Faiva	Hodômetro (km)		Segmento	Velocidade	IRI (m/km)		
Sentido	ғаіха	Início	Fim	Segmento	(km/h)	TRI	TRE	Média
Sul	3	511,000	511,010		71	2,61	2,54	2,58
Sul	3	511,010	511,020		70	1,70	1,86	1,78
Sul	3	511,020	511,030		70	1,65	1,37	1,51
Sul	3	511,030	511,040		70	2,01	1,57	1,79
Sul	3	511,040	511,050		70	2,01	1,83	1,92
Sul	3	511,050	511,060	<b>C</b> A	70	2,04	1,66	1,85
Sul	3	511,060	511,070	CA	70	1,11	1,02	1,07
Sul	3	511,070	511,080		70	2,13	1,45	1,79
Sul	3	511,080	511,090		69	1,57	1,97	1,77
Sul	3	511,090	511,100		69	1,65	0,67	1,16
Sul	3	511,100	511,110		69	1,08	1,03	1,06
Sul	3	511,110	511,120		69	0,83	1,14	0,99
Sul	3	511,120	511,130		68	0,52	1,24	0,88
Sul	3	511,130	511,140		68	0,55	2,00	1,28
Sul	3	511,140	511,150		67	0,91	1,11	1,01
Sul	3	511,150	511,160		65	0,90	1,10	1,00
Sul	3	511,160	511,170		64	1,35	1,35	1,35
Sul	3	511,170	511,180	<b>C</b> A 1	62	2,13	1,49	1,81
Sul	3	511,180	511,190	CA+	60	0,87	1,06	0,97
Sul	3	511,190	511,200		58	0,90	1,20	1,05
Sul	3	511,200	511,210		56	1,24	1,12	1,18
Sul	3	511,210	511,220		54	0,72	0,51	0,62
Sul	3	511,220	511,230		52	0,70	0,87	0,79
Sul	3	511,230	511,240		51	0,92	1,51	1,22
Sul	3	511,240	511,250		50	1,40	1,18	1,29
Sul	3	511,250	511,260		50	1,32	1,43	1,38
Sul	3	511,260	511,270		49	1,26	1,07	1,17
Sul	3	511,270	511,280		48	0,99	1,59	1,29
Sul	3	511,280	511,290		46	1,18	1,68	1,43
Sul	3	511,290	511,300	<b>C</b> A	43	1,42	1,52	1,47
Sul	3	511,300	511,310	CA-	40	0,67	1,62	1,15
Sul	3	511,310	511,320		38	1,67	2,14	1,91
Sul	3	511,320	511,330		36	1,77	2,03	1,90
Sul	3	511,330	511,340		35	1,12	1,31	1,22
Sul	3	511,340	511,350		34	1,09	1,61	1,35
Sul	3	511,350	511,360		33	1,00	1,05	1,03
Sul	3	511,360	511,370	СРА	33	0,89	1,75	1,32

Tabela 146. Ensaio de irregularidade longitudinal (IRI) no trecho experimental: 0 meses

Página 271 de 285

Sul	3	511,370	511,380		32	1,28	2,14	1,71
Sul	3	511,380	511,390		32	1,85	1,53	1,69
Sul	3	511,390	511,400		32	2,05	1,44	1,75
Sul	3	511,400	511,410		32	1,22	1,30	1,26
Sul	3	511,410	511,420		32	1,87	1,49	1,68
Sul	3	511,420	511,430		33	1,30	1,59	1,45
Sul	3	511,430	511,440		32	1,22	1,87	1,55
Sul	3	511,440	511,450		32	1,70	2,16	1,93
Sul	3	511,450	511,460		31	1,40	2,22	1,81
Sul	3	511,460	511,470		31	1,25	1,02	1,14
Sul	3	511,470	511,480		30	1,61	2,04	1,83
Sul	3	511,480	511,490		29	1,34	2,02	1,68
Sul	3	511,490	511,500		28	2,12	0,90	1,51
Sul	3	511,500	511,510		27	0,90	1,33	1,12
Sul	3	511,510	511,520		27	1,33	2,17	1,75
Sul	3	511,520	511,530		27	1,15	1,31	1,23
Sul	3	511,530	511,540		27	2,13	1,85	1,99
Sul	3	511,540	511,550		27	1,39	1,73	1,56
Sul	3	511,550	511,560		27	1,02	1,90	1,46
Sul	3	511,560	511,570		28	1,02	1,90	1,46
Sul	3	511,570	511,580		29	1,23	1,15	1,19
Sul	3	511,580	511,590		30	1,42	0,94	1,18
Sul	3	511,590	511,600		30	1,16	1,06	1,11
Sul	3	511,600	511,610		29	1,28	0,98	1,13
Sul	3	511,610	511,620	SEMI	28	1,03	1,48	1,26
Sul	3	511,620	511,630	JEIVII	28	1,27	1,00	1,14
Sul	3	511,630	511,640		27	1,23	1,27	1,25
Sul	3	511,640	511,650		24	1,45	1,65	1,55
Sul	3	511,650	511,660		22	1,81	1,84	1,83
Sul	3	511,660	511,670		21	1,55	1,39	1,47
Sul	3	511,670	511,680		21	1,98	1,50	1,74
Sul	3	511,680	511,690		21	1,37	1,89	1,63
Sul	3	511,690	511,700		21	1,65	2,21	1,93
Sul	3	511,700	511,710		21	1,22	3,18	2,20
Sul	3	511,710	511,720		22	1,35	1,88	1,62
Sul	3	511,720	511,730		23	1,71	2,01	1,86
Sul	3	511,730	511,740	SEMI+	23	1,25	1,96	1,61
Sul	3	511,740	511,750	SEIVIT.	22	1,36	1,62	1,49
Sul	3	511,750	511,760		22	1,33	1,47	1,40
Sul	3	511,760	511,770		22	0,94	1,22	1,08
Sul	3	511,770	511,780		22	1,79	1,68	1,74
Sul	3	511,780	511,790		22	1,10	1,09	1,10
Sul	3	511,790	511,800		22	1,39	1,36	1,38
Sul	3	511,800	511,810	SEMI-	22	1,11	2,00	1,56
Sul	3	511,810	511,820		22	1,15	1,73	1,44

Página 272 de 285

Sul	3	511,820	511,830		23	1,29	1,48	1,39
Sul	3	511,830	511,840		23	1,80	2,06	1,93
Sul	3	511,840	511,850		24	1,45	1,99	1,72
Sul	3	511,850	511,860		23	1,46	1,83	1,65
Sul	3	511,860	511,870		22	1,26	1,54	1,40
Sul	3	511,870	511,880		22	1,25	0,92	1,09
Sul	3	511,880	511,890		23	1,48	1,04	1,26
Sul	3	511,890	511,900		23	1,23	1,16	1,20
Sul	3	511,900	511,910		24	1,34	1,94	1,64
Sul	3	511,910	511,920		24	1,03	0,86	0,95
Sul	3	511,920	511,930		24	1,25	1,29	1,27
Sul	3	511,930	511,940		25	0,70	0,72	0,71
Sul	3	511,940	511,950		25	0,87	0,94	0,91
Sul	3	511,950	511,960		25	1,28	1,41	1,35
Sul	3	511,960	511,970		26	1,70	1,04	1,37
Sul	3	511,970	511,980		26	1,76	2,10	1,93
Sul	3	511,980	511,990		27	1,35	0,97	1,16
Sul	3	511,990	512,000	CAD	27	1,56	1,90	1,73
Sul	3	512,000	512,010	GAP	27	1,35	1,23	1,29
Sul	3	512,010	512,020		27	1,64	1,87	1,76
Sul	3	512,020	512,030		28	0,90	1,07	0,99
Sul	3	512,030	512,040		29	1,79	1,82	1,81
Sul	3	512,040	512,050		30	1,19	1,74	1,47
Sul	3	512,050	512,060		30	1,23	1,38	1,31
Sul	3	512,060	512,070		30	1,17	1,11	1,14
Sul	3	512,070	512,080		31	2,01	1,77	1,89

Sontido	Faira	Hodôme	Hodômetro (km)		Velocidade	IRI (m/km)		
Sentido	Faixa	Início	Fim	Segmento	(km/h)	TRI	TRE	Média
Sul	3	511,000	511,010		49,9	2,38	2,16	2,27
Sul	3	511,010	511,020		49,3			
Sul	3	511,020	511,030		49,4	1,75	1,75	1,75
Sul	3	511,030	511,040		50,3	1,65	1,45	1,55
Sul	3	511,040	511,050		51,2			
Sul	3	511,050	511,060	<b>C</b> A	52,0			
Sul	3	511,060	511,070	CA	52,5	2,40	1,43	1,92
Sul	3	511,070	511,080		53,2	1,17	1,22	1,20
Sul	3	511,080	511,090		53 <i>,</i> 9	1,71	1,65	1,68
Sul	3	511,090	511,100		54,7	2,28	1,93	2,11
Sul	3	511,100	511,110		55,6	1,26	0,67	0,97
Sul	3	511,110	511,120		56,5	0,74	1,01	0,88
Sul	3	511,120	511,130		57,3	0,98	1,16	1,07
Sul	3	511,130	511,140		58,2	0,62	1,38	1,00
Sul	3	511,140	511,150		58 <i>,</i> 8	0,62	1,77	1,20
Sul	3	511,150	511,160		58,9	1,00	1,04	1,02
Sul	3	511,160	511,170		58,8	0,96	1,03	1,00
Sul	3	511,170	511,180	CA+	58,6	1,29	1,61	1,45
Sul	3	511,180	511,190	CA+	58,2	1,92	1,89	1,91
Sul	3	511,190	511,200		57,8	0,73	1,22	0,98
Sul	3	511,200	511,210		57,5	3,09	1,23	2,16
Sul	3	511,210	511,220		57,4	1,13	1,35	1,24
Sul	3	511,220	511,230		57,3	0,58	0,48	0,53
Sul	3	511,230	511,240		57,6	0,59	0,73	0,66
Sul	3	511,240	511,250		57,9	0,81	1,68	1,25
Sul	3	511,250	511,260		58,2	1,49	3,92	2,71
Sul	3	511,260	511,270		58,5	1,34	2,86	2,10
Sul	3	511,270	511,280		58,7	1,15	1,25	1,20
Sul	3	511,280	511,290		58 <i>,</i> 8	0,85	1,61	1,23
Sul	3	511,290	511,300	<b>C</b> A	58 <i>,</i> 8	3,03	3,20	3,12
Sul	3	511,300	511,310	CA-	58 <i>,</i> 6	1,21	2,50	1,86
Sul	3	511,310	511,320		58,2	0,67	2,26	1,47
Sul	3	511,320	511,330		57,8	2,73	2,86	2,80
Sul	3	511,330	511,340		57,9	1,77	2,29	2,03
Sul	3	511,340	511,350		57,8	1,07	1,09	1,08
Sul	3	511,350	511,360		57,6	1,05	1,27	1,16
Sul	3	511,360	511,370		57,3	1,10	1,21	1,16
Sul	3	511,370	511,380	CDA	57,0	0,96	1,77	1,37
Sul	3	511,380	511,390	UFA	56,8	1,04	1,98	1,51
Sul	3	511,390	511,400		56,7	4,98	1,59	3,29

Tabela 147. Ensaio de irregularidade longitudinal (IRI) no trecho experimental: 5 meses

Página 274 de 285

Sul	3	511,400	511,410		56 <i>,</i> 5	1,51	1,94	1,73
Sul	3	511,410	511,420		56,5	1,16	1,87	1,52
Sul	3	511,420	511,430		56,8	5,31	7,37	6,34
Sul	3	511,430	511,440		57,0	2,61	3,36	2,99
Sul	3	511,440	511,450		56 <i>,</i> 9	1,48	3,61	2,55
Sul	3	511,450	511,460		56,7	1,75	4,95	3,35
Sul	3	511,460	511,470		56,5	1,26	2,41	1,84
Sul	3	511,470	511,480		56 <i>,</i> 4	2,07	11,75	6,91
Sul	3	511,480	511,490		56 <i>,</i> 5	2,44	2,03	2,24
Sul	3	511,490	511,500		56 <i>,</i> 3	3,12	3,26	3,19
Sul	3	511,500	511,510		56,1	3,10	0,85	1,98
Sul	3	511,510	511,520		56 <i>,</i> 0	1,97	2,01	1,99
Sul	3	511,520	511,530		55 <i>,</i> 9	1,18	2,44	1,81
Sul	3	511,530	511,540		56,1	1,89	2,52	2,21
Sul	3	511,540	511,550		56,3	5,75	2,59	4,17
Sul	3	511,550	511,560		56 <i>,</i> 3	0,86	2,22	1,54
Sul	3	511,560	511,570		56,5	3,71	4,90	4,31
Sul	3	511,570	511,580		56 <i>,</i> 9	8,88	7,70	8,29
Sul	3	511,580	511,590		57,1	2,06	5,45	3,76
Sul	3	511,590	511,600		56,9	1,24	1,55	1,40
Sul	3	511,600	511,610	SEMI	56,9	1,29	1,16	1,23
Sul	3	511,610	511,620		57,1	1,49	1,59	1,54
Sul	3	511,620	511,630	JEIVII	57,2	0,63	1,12	0,88
Sul	3	511,630	511,640		57 <i>,</i> 0	1,50	1,38	1,44
Sul	3	511,640	511,650		56,7	1,01	2,21	1,61
Sul	3	511,650	511,660		56 <i>,</i> 4	1,43	3,17	2,30
Sul	3	511,660	511,670		56,1	1,90	4,66	3,28
Sul	3	511,670	511,680		55 <i>,</i> 9	8,71	7,89	8,30
Sul	3	511,680	511,690		55 <i>,</i> 6	7,40	2,64	5,02
Sul	3	511,690	511,700		55,2	1,86	3,58	2,72
Sul	3	511,700	511,710		54,9	4,12	11,85	7,90
Sul	3	511,710	511,720		54,7	3,04	6,27	4,66
Sul	3	511,720	511,730		54,5	1,28	2,80	2,04
Sul	3	511,730	511,740	SFMI+	54,2	1,48	1,59	1,54
Sul	3	511,740	511,750	0LIVII ·	53,9	0,81	1,64	1,23
Sul	3	511,750	511,760		53 <i>,</i> 4	1,68	1,48	1,58
Sul	3	511,760	511,770		53,1	1,67	1,65	1,66
Sul	3	511,770	511,780		53 <i>,</i> 0	0,87	1,32	1,10
Sul	3	511,780	511,790		52,7	1,75	1,33	1,54
Sul	3	511,790	511,800		52,3	1,59	1,21	1,40
Sul	3	511,800	511,810		52,2	1,14	1,44	1,29
Sul	3	511,810	511,820		52,5	1,28	1,84	1,56
Sul	3	511,820	511,830	SEMI-	52 <i>,</i> 8	0,97	1,68	1,33
Sul	3	511,830	511,840		53,1	1,43	1,49	1,46
Sul	3	511,840	511,850		52,9	1,38	2,94	2,16

Página 275 de 285

Sul	3	511,850	511,860		52,0	1,96	3,35	2,66
Sul	3	511,860	511,870		50,6	2,35	3,31	2,83
Sul	3	511,870	511,880		48,9	1,34	1,73	1,54
Sul	3	511,880	511,890		46,8	1,06	0,89	0,98
Sul	3	511,890	511,900		44,5	1,35	1,04	1,20
Sul	3	511,900	511,910		43,0	1,07	1,17	1,12
Sul	3	511,910	511,920		43,2	0,95	2,23	1,59
Sul	3	511,920	511,930		43,4	1,10	0,87	0,99
Sul	3	511,930	511,940		43,7	3,30	1,64	2,47
Sul	3	511,940	511,950		45 <i>,</i> 0	1,32	0,54	0,93
Sul	3	511,950	511,960		45,4	2,38	2,11	2,25
Sul	3	511,960	511,970		44,2	1,95	1,80	1,88
Sul	3	511,970	511,980		42,8	4,34	4,34	4,34
Sul	3	511,980	511,990		42,3	2,60	3,44	3,02
Sul	3	511,990	512,000		42,6	3,01	2,66	2,84
Sul	3	512,000	512,010	CAD	42,9	3,27	1,23	2,25
Sul	3	512,010	512,020	GAP	42,8	2,07	1,49	1,78
Sul	3	512,000	512,010		43,1	1,18	3,09	2,14
Sul	3	512,010	512,020		43,1	0,68	1,45	1,07
Sul	3	512,020	512,030		42,4	1,76	2,14	1,95
Sul	3	512,030	512,040		41,2	1,85	2,83	2,34
Sul	3	512,040	512,050		40,5	1,18	1,72	1,45
Sul	3	512,050	512,060		40,7	0,94	0,92	0,93
Sul	3	512,060	512,070		41,4	2,19	2,57	2,38
Sul	3	512,070	512,080		41,9	2,20	2,73	2,47

Sontido	Faira	Hodôme	etro (km)	Segmento	Velocidade	IRI (m/km)		
Sentido	FdiXd	Início	Fim	Segmento	(km/h)	TRI	TRE	Média
Sul	3	511,000	511,010		51,0	2,13	2,19	2,16
Sul	3	511,020	511,030		50,4	1,84	1,86	1,85
Sul	3	511,060	511,070		52,8	2,01	1,48	1,75
Sul	3	511,070	511,080	<b>C</b> A	53,0	1,21	1,37	1,29
Sul	3	511,080	511,090	CA	53,4	1,93	1,31	1,62
Sul	3	511,090	511,100		54,0	2,39	2,19	2,29
Sul	3	511,100	511,110		54,7	1,31	0,65	0,98
Sul	3	511,110	511,120		55,5	0,73	0,89	0,81
Sul	3	511,120	511,130		56,2	1,06	1,06	1,06
Sul	3	511,130	511,140		56,6	0,69	1,20	0,95
Sul	3	511,140	511,150		57,0	0,67	1,88	1,28
Sul	3	511,150	511,160		57,2	0,88	1,04	0,96
Sul	3	511,160	511,170		57,2	1,07	1,03	1,05
Sul	3	511,170	511,180	<b>CA</b> :	56,9	1,35	1,81	1,58
Sul	3	511,180	511,190	CA+	56,7	2,01	2,04	2,03
Sul	3	511,190	511,200		57,0	0,79	1,53	1,16
Sul	3	511,200	511,210		57,4	7,17	2,72	4,95
Sul	3	511,210	511,220		57 <i>,</i> 8	1,17	1,98	1,58
Sul	3	511,220	511,230		58,1	0,58	1,26	0,92
Sul	3	511,230	511,240		58,4	0,66	0,99	0,83
Sul	3	511,240	511,250		58,8	0,93	1,58	1,26
Sul	3	511,250	511,260		58,9	1,40	3,24	2,32
Sul	3	511,260	511,270		58,9	1,30	4,62	2,96
Sul	3	511,270	511,280		58,9	1,36	1,46	1,41
Sul	3	511,280	511,290		58,9	0,83	1,55	1,19
Sul	3	511,290	511,300	<b>C</b> A	58,6	5,06	1,49	3,28
Sul	3	511,300	511,310	CA-	58,3	1,27	2,14	1,71
Sul	3	511,310	511,320		58,0	0,63	1,30	0,97
Sul	3	511,320	511,330		58,0	2,56	3,58	3,07
Sul	3	511,330	511,340		57,9	2,07	2,39	2,23
Sul	3	511,340	511,350		57,5	1,10	1,28	1,19
Sul	3	511,350	511,360		56,5	1,12	1,53	1,33
Sul	3	511,360	511,370		56,3	1,14	1,47	1,31
Sul	3	511,370	511,380		56,2	0,90	1,76	1,33
Sul	3	511,380	511,390		55 <i>,</i> 8	1,07	2,68	1,88
Sul	3	511,390	511,400	<b>CD</b> A	54,6	4,82	2,03	3,43
Sul	3	511,400	511,410	CPA	53,9	1,63	2,47	2,05
Sul	3	511,410	511,420		53,5	1,45	1,46	1,46
Sul	3	511,420	511,430		53 <i>,</i> 5	3,30	6,14	4,72
Sul	3	511,430	511,440		53,7	2,18	3,38	2,78

Tabela 148. Ensaio de irregularidade longitudinal (IRI) no trecho experimental: 6 meses

Página 277 de 285

Sul	3	511,440	511,450		53,8	4,36	2,98	3,67
Sul	3	511,450	511,460		54,4	3,33	2,00	2,67
Sul	3	511,460	511,470		54,9	2,09	1,92	2,01
Sul	3	511,470	511,480		55,3	1,77	1,60	1,69
Sul	3	511,480	511,490		55,9	1,22	1,47	1,35
Sul	3	511,490	511,500		56,4	1,68	2,20	1,94
Sul	3	511,500	511,510		56,6	1,83	1,32	1,58
Sul	3	511,510	511,520		56,7	1,18	2,97	2,08
Sul	3	511,520	511,530		56,8	1,33	2,25	1,79
Sul	3	511,530	511,540		56,9	2,39	1,98	2,19
Sul	3	511,540	511,550		56,9	2,86	2,28	2,57
Sul	3	511,550	511,560		56 <i>,</i> 5	3,08	1,92	2,50
Sul	3	511,560	511,570		56,0	2,26	3,43	2,85
Sul	3	511,570	511,580		55,6	3,90	6,08	4,99
Sul	3	511,580	511,590		55,3	2,01	2,52	2,27
Sul	3	511,590	511,600		54,9	1,21	2,69	1,95
Sul	3	511,600	511,610		54,4	1,67	1,12	1,40
Sul	3	511,610	511,620	SEMI	54,0	1,75	1,95	1,85
Sul	3	511,620	511,630	JEIVII	53,7	0,93	1,53	1,23
Sul	3	511,630	511,640		53 <i>,</i> 8	1,11	0,94	1,03
Sul	3	511,640	511,650		53,9	1,68	2,47	2,08
Sul	3	511,650	511,660		53 <i>,</i> 9	1,14	2,55	1,85
Sul	3	511,660	511,670		54,1	1,66	3,55	2,61
Sul	3	511,670	511,680		54,2	1,52	7,58	4,55
Sul	3	511,680	511,690		54,2	7,80	3,95	5,88
Sul	3	511,690	511,700		53,9	2,79	4,09	3,44
Sul	3	511,700	511,710		53,7	1,75	6,13	3,94
Sul	3	511,710	511,720		54,0	0,73	2,81	1,77
Sul	3	511,720	511,730		54,2	1,03	2,28	1,66
Sul	3	511,730	511,740	SEMI+	54,7	1,68	1,80	1,74
Sul	3	511,740	511,750	SEIMIT	55 <i>,</i> 0	1,10	1,75	1,43
Sul	3	511,750	511,760		54,8	1,13	1,23	1,18
Sul	3	511,760	511,770		54,3	2,71	1,83	2,27
Sul	3	511,770	511,780		54,4	0,89	0,89	0,89
Sul	3	511,780	511,790		54,8	1,65	1,48	1,57
Sul	3	511,790	511,800		55,0	1,76	0,93	1,35
Sul	3	511,800	511,810		55,5	1,84	11,75	6,80
Sul	3	511,810	511,820		56,3	2,01	1,85	1,93
Sul	3	511,820	511,830		57,0	1,33	1,15	1,24
Sul	3	511,830	511,840		57,8	2,19	3,34	2,77
Sul	3	511,840	511,850	SEMI-	58,4	2,87	2,12	2,50
Sul	3	511,850	511,860		58,7	3,55	2,45	3,00
Sul	3	511,860	511,870		58,9	1,61	3,30	2,46
Sul	3	511,870	511,880		58,9	1,51	1,84	1,68
Sul	3	511,880	511,890		58 <i>,</i> 6	3,31	1,03	2,17

Página 278 de 285

Sul	3	511,890	511,900		58 <i>,</i> 0	3,00	1,49	2,25
Sul	3	511,900	511,910		57,3	1,27	0,91	1,09
Sul	3	511,910	511,920		56 <i>,</i> 8	0,90	3,31	2,11
Sul	3	511,920	511,930		56,1	0,88	1,61	1,25
Sul	3	511,930	511,940		55,3	1,81	2,32	2,07
Sul	3	511,940	511,950		55 <i>,</i> 0	0,73	3,87	2,30
Sul	3	511,950	511,960		55,0	0,91	1,86	1,39
Sul	3	511,960	511,970		55,5	1,35	1,78	1,57
Sul	3	511,970	511,980		56,0	1,83	2,75	2,29
Sul	3	511,980	511,990		56,2	1,69	2,42	2,06
Sul	3	511,990	512,000	CAD	56,3	1,22	1,20	1,21
Sul	3	512,000	512,010	GAP	56,4	1,18	1,51	1,35
Sul	3	512,010	512,020		56,5	1,40	2,54	1,97
Sul	3	512,020	512,030		56 <i>,</i> 5	1,51	4,36	2,94
Sul	3	512,030	512,040		56,6	0,94	2,36	1,65
Sul	3	512,040	512,050		57,0	1,55	1,65	1,60
Sul	3	512,050	512,060		57,2	2,06	3,13	2,60
Sul	3	512,060	512,070		57,2	1,76	1,72	1,74
Sul	3	512,070	512,080		57,1	0,98	1,42	1,20

Sontido	Faira	Hodômetro (km)		Sogmonto	Velocidade	IRI (m/km)		
Sentido	Faixa	Início	Fim	Segmento	(km/h)	TRI	TRE	Média
Sul	3	511,020	511,030		48,2	1,24	1,71	1,48
Sul	3	511,030	511,040		48,3	1,68	1,15	1,42
Sul	3	511,060	511,070		48,9	1,42	0,73	1,08
Sul	3	511,070	511,080	<b>C</b> A	49,1	1,35	1,29	1,32
Sul	3	511,080	511,090	CA	49,2	2,71	2,42	2,57
Sul	3	511,090	511,100		49,5	1,64	0,89	1,27
Sul	3	511,100	511,110		49,8	0,69	0,84	0,77
Sul	3	511,110	511,120		50,1	1,01	1,01	1,01
Sul	3	511,120	511,130		50,4	0,67	1,48	1,08
Sul	3	511,130	511,140		50,7	0,76	1,68	1,22
Sul	3	511,140	511,150		50,9	0,98	0,99	0,99
Sul	3	511,150	511,160		50 <i>,</i> 8	1,10	1,31	1,21
Sul	3	511,160	511,170		50,3	2,60	4,13	3,37
Sul	3	511,170	511,180	<b>C</b> A 1	50,4	11,73	4,34	8,04
Sul	3	511,180	511,190	CAŦ	50,7	0,90	2,12	1,51
Sul	3	511,190	511,200		50,9	11,84	5,65	8,75
Sul	3	511,200	511,210		51,3	2,00	1,05	1,53
Sul	3	511,210	511,220		51,7	0,74	1,36	1,05
Sul	3	511,220	511,230		52,2	0,55	0,85	0,70
Sul	3	511,230	511,240		52,8	0,93	1,33	1,13
Sul	3	511,240	511,250		53,2	1,41	2,93	2,17
Sul	3	511,250	511,260		53 <i>,</i> 5	1,32	5,95	3,64
Sul	3	511,260	511,270		53,0	1,23	1,75	1,49
Sul	3	511,270	511,280		52 <i>,</i> 8	1,83	2,42	2,13
Sul	3	511,280	511,290		52,7	11,97	9,87	10,92
Sul	3	511,290	511,300	CA.	52,8	1,46	7,80	4,63
Sul	3	511,300	511,310	CA-	53 <i>,</i> 0	0,98	2,67	1,83
Sul	3	511,310	511,320		53,1	2,73	3,22	2,98
Sul	3	511,320	511,330		53,4	1,95	2,55	2,25
Sul	3	511,330	511,340		53 <i>,</i> 6	2,10	1,69	1,90
Sul	3	511,340	511,350		53,5	1,14	1,83	1,49
Sul	3	511,350	511,360		52,2	1,11	1,77	1,44
Sul	3	511,360	511,370		51,2	1,01	4,03	2,52
Sul	3	511,370	511,380		51,1	2,29	9,49	5,89
Sul	3	511,380	511,390		51,1	6,02	1,94	3,98
Sul	3	511,390	511,400	CDA	50,6	2,27	2,12	2,20
Sul	3	511,400	511,410	CPA	49,5	3,02	5,36	4,19
Sul	3	511,410	511,420		49,1	3,03	7,00	5,02
Sul	3	511,420	511,430		48,4	7,61	11,99	9,80
Sul	3	511,430	511,440		47,9	11,84	9,78	10,81

Tabela 149. Ensaio de irregularidade longitudinal (IRI) no trecho experimental: 8 meses

Página 280 de 285

Sul	3	511,440	511,450		47,4	2,55	11,96	7,26
Sul	3	511,450	511,460		46,4	1,06	7,56	4,31
Sul	3	511,460	511,470		45,9	5,10	5,93	5,52
Sul	3	511,470	511,480		45,7	2,60	11,92	7,26
Sul	3	511,480	511,490		45,5	5 <i>,</i> 89	2,83	4,36
Sul	3	511,490	511,500		45,4	5,07	1,39	3,23
Sul	3	511,500	511,510		45,0	4,36	11,85	8,11
Sul	3	511,510	511,520		44,0	1,87	2,93	2,40
Sul	3	511,520	511,530		45,4	3,39	7,70	5,55
Sul	3	511,530	511,540		46,4	4,14	4,98	4,56
Sul	3	511,540	511,550		47,3	1,99	3,14	2,57
Sul	3	511,550	511,560		48,2	4,62	6,81	5,72
Sul	3	511,560	511,570		49,0	3,12	5,87	4,50
Sul	3	511,570	511,580		49,9	1,69	4,04	2,87
Sul	3	511,580	511,590		50,6	1,84	4,38	3,11
Sul	3	511,590	511,600		50,5	11,86	3,20	7,53
Sul	3	511,600	511,610		50,6	4,63	2,68	3,66
Sul	3	511,610	511,620	SEMI	51,1	1,45	1,37	1,41
Sul	3	511,620	511,630	JEIVII	51,1	4,57	2,47	3,52
Sul	3	511,630	511,640		50 <i>,</i> 3	1,14	3,07	2,11
Sul	3	511,640	511,650		49,7	2,06	4,86	3,46
Sul	3	511,650	511,660		49,6	6,11	11,96	9,04
Sul	3	511,660	511,670		49,0	11,95	6,91	9,43
Sul	3	511,670	511,680		48,7	11,84	8,68	10,26
Sul	3	511,680	511,690		49,0	2,79	10,95	6,87
Sul	3	511,690	511,700		49,9	0,88	6,82	3,85
Sul	3	511,700	511,710		50,7	1,00	2,83	1,92
Sul	3	511,710	511,720		51,7	1,64	1,97	1,81
Sul	3	511,720	511,730		52,7	1,47	2,03	1,75
Sul	3	511,730	511,740	SEMI+	53 <i>,</i> 8	1,53	1,50	1,52
Sul	3	511,740	511,750	021111	54,7	5,47	3,02	4,25
Sul	3	511,750	511,760		55 <i>,</i> 8	2,06	2,38	2,22
Sul	3	511,760	511,770		56 <i>,</i> 5	4,15	1,79	2,97
Sul	3	511,770	511,780		55,7	4,52	1,61	3,07
Sul	3	511,780	511,790		55,6	11,96	3,94	7,95
Sul	3	511,790	511,800		55,5	11,61	7,87	9,74
Sul	3	511,800	511,810		56,1	1,72	2,58	2,15
Sul	3	511,810	511,820		57 <i>,</i> 0	1,61	1,89	1,75
Sul	3	511,820	511,830		57,9	1,53	8,09	4,81
Sul	3	511,830	511,840		58,9	2,17	4,52	3,35
Sul	3	511,840	511,850	SEMI-	59 <i>,</i> 7	3,30	5,01	4,16
Sul	3	511,850	511,860		59 <i>,</i> 8	1,94	4,31	3,13
Sul	3	511,860	511,870		58 <i>,</i> 6	1,26	2,45	1,86
Sul	3	511,870	511,880		57 <i>,</i> 6	1,13	1,96	1,55
Sul	3	511,880	511,890		57,2	1,95	5,90	3,93

Página 281 de 285

Sul	3	511,890	511,900		57,3	1,84	8,10	4,97
Sul	3	511,900	511,910		57,2	1,02	2,70	1,86
Sul	3	511,910	511,920		56,9	2,15	2,31	2,23
Sul	3	511,920	511,930		56,7	0,65	3,28	1,97
Sul	3	511,930	511,940		55,7	1,30	0,98	1,14
Sul	3	511,940	511,950		54,7	2,66	1,81	2,24
Sul	3	511,950	511,960		54,7	2,71	3,26	2,99
Sul	3	511,960	511,970		54,4	1,52	2,14	1,83
Sul	3	511,970	511,980		54,2	1,40	1,57	1,49
Sul	3	512,000	512,010	CAD	53,8	1,99	2,89	2,44
Sul	3	512,010	512,020	GAP	53,7	5,35	4,09	4,72
Sul	3	512,020	512,030		53,5	2,28	4,42	3,35
Sul	3	512,030	512,040		52,5	3,88	1,63	2,76
Sul	3	512,040	512,050		51,6	2,88	2,94	2,91
Sul	3	512,050	512,060		50,8	5,86	2,40	4,13
Sul	3	512,060	512,070		50,5	2,29	1,41	1,85
Sul	3	512,070	512,080		50,5	1,60	2,01	1,81

Contido	Foixo	Hodômetro (km)		Sogmonto	Velocidade	IRI (m/km)		
Sentido	Faixa	Início	Fim	Segmento	(km/h)	TRI	TRE	Média
Sul	3	511,000	511,010		53,6	1,94	2,34	2,14
Sul	3	511,010	511,020		53,1	6,87	3,83	5,35
Sul	3	511,020	511,030	-	52,7	2,08	2,09	2,09
Sul	3	511,030	511,040		52,2	1,19	1,68	1,44
Sul	3	511,040	511,050		52,0	2,11	1,39	1,75
Sul	3	511,050	511,060	<b>C</b> A	52,2	4,33	5,01	4,67
Sul	3	511,060	511,070	CA	52,8	4,72	1,89	3,31
Sul	3	511,070	511,080	, ſ	53 <i>,</i> 5	0,96	1,17	1,07
Sul	3	511,080	511,090		54,0	1,60	2,94	2,27
Sul	3	511,090	511,100	-	54,0	2,58	2,91	2,75
Sul	3	511,100	511,110		54,0	1,31	0,90	1,11
Sul	3	511,110	511,120		53 <i>,</i> 9	0,77	0,92	0,85
Sul	3	511,120	511,130		53,7	1,07	1,16	1,12
Sul	3	511,130	511,140		53,2	0,81	2,15	1,48
Sul	3	511,140	511,150		52,8	0,72	1,95	1,34
Sul	3	511,150	511,160		52,6	0,81	1,18	1,00
Sul	3	511,160	511,170		52,6	1,19	1,31	1,25
Sul	3	511,170	511,180	<b>CA</b> :	52,8	1,62	3,88	2,75
Sul	3	511,180	511,190	CA+	53,0	6,70	3,09	4,90
Sul	3	511,190	511,200		53,2	0,59	2,90	1,75
Sul	3	511,200	511,210		53,4	4,53	4,14	4,34
Sul	3	511,210	511,220		53,7	2,20	2,69	2,45
Sul	3	511,220	511,230		53,9	1,04	1,66	1,35
Sul	3	511,230	511,240		54,2	0,70	0,87	0,79
Sul	3	511,240	511,250		54,4	0,89	1,29	1,09
Sul	3	511,250	511,260		54,6	1,47	8,18	4,83
Sul	3	511,260	511,270		54,7	1,22	10,69	5,96
Sul	3	511,270	511,280		54,7	1,62	1,78	1,70
Sul	3	511,280	511,290		54,7	1,51	1,59	1,55
Sul	3	511,290	511,300	<b>C</b> A	54,8	7,14	5,22	6,18
Sul	3	511,300	511,310	CA-	54,9	3,44	11,96	7,70
Sul	3	511,310	511,320		54,9	1,11	4,76	2,94
Sul	3	511,320	511,330		54,8	2,57	3,56	3,07
Sul	3	511,330	511,340		54,7	2,18	2,30	2,24
Sul	3	511,340	511,350		54,6	2,17	2,37	2,27
Sul	3	511,350	511,360		54,5	1,14	2,04	1,59
Sul	3	511,360	511,370		54,4	1,00	1,97	1,49
Sul	3	511,370	511,380	<b>CD A</b>	54,3	1,27	2,47	1,87
Sul	3	511,380	511,390	CPA	54,1	1,47	11,99	6,73
Sul	3	511,390	511,400		54,1	2,97	5,39	4,18

Tabela 150. Ensaio de irregularidade longitudinal (IRI) no trecho experimental: 12 meses

Página 283 de 285

Sul	3	511,400	511,410		53 <i>,</i> 8	6,97	2,24	4,61
Sul	3	511,410	511,420		53,2	11,95	8,15	10,05
Sul	3	511,420	511,430		52,5	8,95	11,89	10,42
Sul	3	511,430	511,440		51,7	6,65	5,88	6,27
Sul	3	511,440	511,450		50 <i>,</i> 8	11,09	11,96	11,53
Sul	3	511,450	511,460		50,1	5,62	6,43	6,03
Sul	3	511,460	511,470		49,3	1,66	11,96	6,81
Sul	3	511,470	511,480		48,5	1,42	6,01	3,72
Sul	3	511,480	511,490		47,7	3,26	5,80	4,53
Sul	3	511,490	511,500		46,7	7,75	10,33	9,04
Sul	3	511,500	511,510		45,5	5,19	5,67	5,43
Sul	3	511,510	511,520		44,3	6,35	1,78	4,07
Sul	3	511,520	511,530		43,2	6,54	11,06	8,80
Sul	3	511,530	511,540		42,0	1,94	3,21	2,58
Sul	3	511,540	511,550		41,1	4,15	4,89	4,52
Sul	3	511,550	511,560		40,4	4,84	7,97	6,41
Sul	3	511,560	511,570		40,1	2,00	5,21	3,61
Sul	3	511,570	511,580		40,7	6,43	6,13	6,28
Sul	3	511,580	511,590		41,1	4,52	5,56	5,04
Sul	3	511,590	511,600		41,0	1,25	4,63	2,94
Sul	3	511,600	511,610		40,9	1,49	6,18	3,84
Sul	3	511,610	511,620	SEMI	41,1	11,92	5,58	8,75
Sul	3	511,620	511,630		40,9	5,78	10,17	7,98
Sul	3	511,630	511,640		40,5	1,39	3,88	2,64
Sul	3	511,640	511,650		40,0	11,20	4,23	7,72
Sul	3	511,650	511,660		39,4	1,96	3,83	2,90
Sul	3	511,660	511,670		38,6	1,35	5,30	3,33
Sul	3	511,670	511,680		37,9	2,82	11,98	7,40
Sul	3	511,680	511,690		37,1	11,83	10,80	11,32
Sul	3	511,690	511,700		36,4	11,97	6,99	9,48
Sul	3	511,700	511,710		35,6	5,55	7,90	6,73
Sul	3	511,710	511,720		34,8	1,58	4,02	2,80
Sul	3	511,720	511,730		33,8	1,27	2,58	1,93
Sul	3	511,730	511,740	SEMIT	33,0	1,89	2,37	2,13
Sul	3	511,740	511,750	SLIVIIT	32,4	1,49	1,70	1,60
Sul	3	511,750	511,760		31,9	1,78	1,99	1,89
Sul	3	511,760	511,770		32,2	4,79	2,41	3,60
Sul	3	511,770	511,780		32,4	3,71	1,26	2,49
Sul	3	511,780	511,790		33,7	4,09	1,90	3,00
Sul	3	511,790	511,800		35,9	4,59	2,92	3,76
Sul	3	511,800	511,810		37,7	5,82	2,79	4,31
Sul	3	511,810	511,820		38,0	4,29	9,75	7,02
Sul	3	511,820	511,830	SEMI-	38,1	5,02	5,78	5,40
Sul	3	511,830	511,840		37,9	1,83	1,71	1,77
Sul	3	511,840	511,850		37,9	1,66	2,12	1,89

Página 284 de 285

Sul	3	511,850	511,860		38,2	2,02	6,42	4,22
Sul	3	511,860	511,870		38,7	2,53	4,89	3,71
Sul	3	511,870	511,880		39,1	2,92	7,34	5,13
Sul	3	511,880	511,890		39,0	1,66	3,65	2,66
Sul	3	511,890	511,900		38,4	1,30	2,10	1,70
Sul	3	511,900	511,910		37,4	1,09	3,14	2,12
Sul	3	511,910	511,920		36,2	1,32	9,21	5,27
Sul	3	511,920	511,930		35,0	2,27	11,94	7,11
Sul	3	511,930	511,940		33,7	1,54	8,04	4,79
Sul	3	511,940	511,950		32,5	2,08	3,88	2,98
Sul	3	511,950	511,960		32,5	0,90	11,92	6,41
Sul	3	511,960	511,970		33,0	0,87	3,71	2,29
Sul	3	511,970	511,980		33,4	1,22	3,02	2,12
Sul	3	511,980	511,990		33,4	2,49	4,58	3,54
Sul	3	511,990	512,000		33,0	1,34	2,01	1,68
Sul	3	512,000	512,010	GAD	33,2	1,35	1,33	1,34
Sul	3	512,010	512,020	GAP	33,0	2,34	2,89	2,62
Sul	3	512,000	512,010		32,5	10,40	3,45	6,93
Sul	3	512,010	512,020		31,1	5,23	5,32	5,28
Sul	3	512,020	512,030		29,4	7,71	1,84	4,78
Sul	3	512,030	512,040		29,6	3,61	3,02	3,32
Sul	3	512,040	512,050		29,5	2,56	2,91	2,74
Sul	3	512,050	512,060		30,3	10,20	1,51	5,86
Sul	3	512,060	512,070		31,1	1,41	1,44	1,43
Sul	3	512,070	512,080		31,7	2,06	2,96	2,51