

Recursos para Desenvolvimento Tecnológico - RDT

Capítulo XX do Edital 01, Lote 06, item 10 do PER

Rodovia BR 116 – Trecho São Paulo - Curitiba

PROJETO 02 - SGP/ARB_02 REV.01

**AVALIAÇÃO DA RELAÇÃO ENTRE A ENERGIA CONSERVADA E FADIGA / DEFORMAÇÃO
PERMANENTE**

PARTE 2

Autopista Régis Bittencourt
arteris

RELATÓRIO FINAL

JANEIRO 2013

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	4
1. CONCESSIONÁRIA.....	10
2. DESCRIÇÃO DO PROJETO	10
2.1 TÍTULO DO PROJETO.....	10
2.2 OBJETIVO	10
3. JUSTIFICATIVA	11
4. DESENVOLVIMENTO DO PROJETO	12
4.1 RELATÓRIO DE ACOMPANHAMENTO I (Abril/2011)	13
4.2 RELATÓRIO DE ACOMPANHAMENTO II (Julho/2011)	13
4.3 RELATÓRIO DE ACOMPANHAMENTO III (Outubro/2011)	14
4.4 RELATÓRIO DE ACOMPANHAMENTO IV (Janeiro/2012)	14
4.5 RELATÓRIO DE ACOMPANHAMENTO V (Abril/2012)	15
4.6 RELATÓRIO DE ACOMPANHAMENTO VI (Julho/2012)	15
4.7 RELATÓRIO DE ACOMPANHAMENTO VII (Outubro/2012)	15
4.8 RELATÓRIO FINAL DE ACOMPANHAMENTO VIII (Fevereiro/2013)	15
5. AVALIAÇÃO DAS MISTURAS ASFÁLTICAS DA PARTE 1 DO PROJETO	16
6. CAMADA ASFÁLTICA INTERMEDIÁRIA ANTI-REFLEXÃO DE TRINCAS (SAMI)	31
6.1 Revisão Bibliográfica.....	31
6.1.1 <i>Procedimentos de Dosagem do SAMI</i>	31
6.1.2 <i>Espessura da Camada de SAMI</i>	35
6.2 Dosagem do SAMI	39
7. TRECHO EXPERIMENTAL.....	48
7.1 'As Built' da Obra	48
7.2 Execução do Trecho Experimental	50
7.3 Controle tecnológico	57
7.4 Controle Deflectométrico.....	60
7.5 Ensaios de Comportamento Mecânico – Controle Tecnológico	62
7.5.1 <i>Aderência entre Camadas – Leutner Test</i>	62

7.5.2	Parâmetros Volumétricos	65
7.5.3	Resistência à Tração por Compressão Diametral	66
7.5.4	Módulo de Resiliência.....	67
7.6	Monitoramento – Condições Estruturais	68
7.7	Retroanálise.....	72
7.8	Análise de Sensibilidade	74
7.9	Monitoramento – Condições Funcionais	77
8	AVALIAÇÃO LABORATORIAL DAS MISTURAS APLICADAS NO TRECHO EXPERIMENTAL	80
8.1	Ensaio Reológicos nos Ligantes Asfálticos	81
8.1.1	Varredura de Frequência e Temperatura	83
8.1.2	MSCR	86
8.2	Corpos de Prova Moldados em Laboratório.....	89
8.2.1	Parâmetros Volumétricos	91
8.2.2	Módulo de Resiliência.....	92
8.2.3	Resistência à Tração por Compressão Diametral – Energia Dissipada.....	94
8.2.4	Ensaio de Fratura em Amostras Semi-Circulares – Energia dissipada	96
8.2.5	Ensaio de Fadiga por Compressão Diametral (Tensão Controlada)	99
9	CONSIDERAÇÕES FINAIS	103
10	ENTIDADE E EQUIPE EXECUTORA	107
11	REFERÊNCIAS.....	108

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Misturas asfálticas selecionadas para investigação da PARTE 2 do projeto.....	16
Figura 2. Ensaio de resistência à tração por compressão diametral – princípios do ensaio	17
Figura 3. Ilustração dos parâmetros obtidos do ensaio de resistência à tração por compressão diametral modificado	18
Figura 4. Comparativo entre diferentes ligantes asfálticos	19
Figura 5. Comparativo entre diferentes granulometrias, utilizando o CAP 30/45	21
Figura 6. Comparativo entre diferentes granulometrias, utilizando o ligante SBS 60/85	22
Figura 7. Cálculo padronizado de energia dissipada a partir da curva obtida no ensaio de resistência à tração .	24
Figura 8. Mistura B, com resultado discrepante excluído da avaliação	25
Figura 10. Mistura Q – Deformação limitada a 5 mm	26
Figura 11. Relação entre módulo de resiliência e resistência à tração (32 misturas asfálticas – Parte 1)	29
Figura 12. Comparativo dos valores de resistência à tração e energia dissipada total (a) 5°C, (b) 15°C, (c) 25°C e (d) 35°C.....	31
Figura 13. Corpo de prova retirado de campo ilustrando a propagação da trinca na camada superior, porém com a camada intermediária íntegra (BLANKENSHIP et al., 2004)	36
Figura 14. Estruturas de pavimentos estudadas por MAKOWSKI et al. (2005)	37
Figura 15. Corpo de prova da estrutura do pavimento estudado por BENNERT et al. (2009) e ilustração da camada intermediária anti-reflexão de trincas ainda íntegra.	38
Figura 16. Estruturas de pavimentos estudadas por SHIMAZATI et al. (2010).....	39
Figura 17. Distribuição granulométrica adotada para o SAMI	39
Figura 18. CDI, TDI e TDI_m determinados a partir da curva de compactação Superpave (LOPES et al., 2011).....	41
Figura 19. Ilustração do fracionamento dos agregados peneira a peneira para composição da granulometria do SAMI feita no CDT	42
Figura 20. Volume de vazios (a) comparativos dos métodos de compactação e (b) comparativo entre diferentes ligantes asfálticos	43
Figura 21. Módulo de resiliência (a) comparativos dos métodos de compactação e (b) comparativo entre diferentes ligantes asfálticos.....	44
Figura 22. Resistência à tração por compressão diametral (velocidade de carregamento = 1mm/min) (a) comparativos dos métodos de compactação e (b) comparativo entre diferentes ligantes asfálticos.....	45
Figura 23. Energia total - determinada a partir dos dados obtidos do ensaio de RT_m (a) comparativos dos métodos de compactação e (b) comparativo entre diferentes ligantes asfálticos	46
Figura 24. Energia até a carga máxima - determinada a partir dos dados obtidos do ensaio de RT_m (a) comparativos dos métodos de compactação e (b) comparativo entre diferentes ligantes asfálticos.....	47
Figura 25. 'As Built' dos trechos experimentais – sentido Norte, (a) Faixa I e (b) Faixa II	49
Figura 26. Condição do trecho experimental antes do início da obra.....	50
Figura 27. Ilustração da produção do HiMA	51

Figura 28. Produção da massa asfáltica: (a) conexão do tanque de ligante diretamente na usina; (b) carregamento do caminhão; (c) coleta de material para envio aos laboratórios da LTP/USP e CDT; e (d) usina gravimétrica utilizada na produção da massa asfáltica	52
Figura 29. Processo de fresagem	53
Figura 30. (a) Limpeza da faixa fresada e (b) Aplicação da pintura de ligação	54
Figura 31. Lançamento e compactação do SAMI	55
Figura 32. Textura final do SAMI	56
Figura 33. Execução da camada de revestimento e vista do Trecho experimental após a conclusão da obra	56
Figura 34. Extração de corpos de prova após o término da obra.....	57
Figura 35. Ilustração da divisão dos grupos para determinação dos parâmetros volumétricos e ensaios mecânicos de MR e RT – Faixa I	58
Figura 36. Ilustração da divisão dos grupos para determinação dos parâmetros volumétricos e ensaios mecânicos de MR e RT – Faixa II	58
Figura 37. Resultado do controle deflectométrico com a viga Benkelman, Faixas: (a) I e (b) II.....	60
Figura 38. Resultado do controle deflectométrico na caixa fresada com a viga Benkelman - Faixa II.....	61
Figura 39. (a) ilustração do acessório confeccionado para o ensaio de cisalhamento direto em amostras circulares, e (b) prensa MTS utilizada para o ensaio	63
Figura 40. Ilustração da divisão dos grupos para ensaio de aderência – Faixa I	64
Figura 41. Ilustração da divisão dos grupos para ensaio de aderência – Faixa II	64
Figura 42. Resultados de aderência entre CBUQ e SAMI	65
Figura 43. Volume de vazios das misturas asfálticas tipo CBUQ – Faixa I	66
Figura 44. Volume de vazios das misturas asfálticas tipo CBUQ – Faixa II	66
Figura 45. Resistência à tração por compressão diametral modificada das misturas asfálticas tipo CBUQ – Faixa I	67
Figura 46. Resistência à tração por compressão diametral modificada das misturas asfálticas tipo CBUQ – Faixa II.....	67
Figura 47. Módulo de Resiliência das misturas asfálticas tipo CBUQ – Faixa I.....	68
Figura 48. Módulo de Resiliência das misturas asfálticas tipo CBUQ – Faixa II	68
Figura 49. Equipamentos de medidas de deflexão: (a) viga Benkelman e (b) FWD	69
Figura 50. Resultado do controle deflectométrico: (a) Faixa I, e (b) Faixa II	70
Figura 51. Comparativo dos resultados obtidos com a viga Benkelman e com o FWD nas Faixas: (a) I e (b) II	71
Figura 52. Estruturas adotadas na Retroanálise: (a) Faixa I, e (b) Faixa II	73
Figura 53. Características consideradas na simulação	75
Figura 54. Resultados da simulação (Deformação na fibra inferior do SAMI).....	76
Figura 55. Resultados da simulação (Deformação na fibra inferior do CBUQ).....	76
Figura 56. Resultados da simulação (Deflexão no topo do revestimento)	76
Figura 57. Condições funcionais avaliadas nas duas faixas de tráfego com equipamento específico no trecho experimental	77
Figura 58. Dados de levantamento de condições funcionais	78

Figura 59. Divisa entre os segmentos I e II, com maior área de trincamentos no primeiro.....	79
Figura 60. Segmento I (a) com maior área de trincamento do que o segmento IV (b)	80
Figura 61. Faixa I à direita sem defeitos funcionais.....	80
Figura 62. Reômetro de cisalhamento dinâmico do LMP/UFC.....	81
Figura 63. Estufa de Filme Fino Rotativo – RTFOT (simulação do envelhecimento de curto prazo)	82
Figura 64. Varredura de frequência a 58°C	83
Figura 65. Varredura de frequência a 64°C	84
Figura 66. Varredura de frequência a 70°C	84
Figura 67. Varredura de frequência a 76°C	84
Figura 68. Varredura de frequência a 82°C	85
Figura 69. Varredura de frequência a 88°C	85
Figura 70. Ilustração da amostra de HiMA após o ensaio a 88°C.....	85
Figura 71. Representação esquemática da sequencia do ensaio de MSCR, ilustrando os dois níveis de tensão (D’Angelo e Dongre, 2009)	86
Figura 72. Resultados do ensaio de <i>Multiple Stress Creep and Recovery</i> para: (a) 100Pa e (b) 3200Pa	87
Figura 73. Função fluência não recuperável para os três ligantes avaliados	88
Figura 74. Etapas da preparação dos corpos de prova para os ensaios mecânicos	90
Figura 75. Variação do volume de vazios com o tamanho do corpo de prova.....	91
Figura 76. Módulo de resiliência	93
Figura 77. (a) Resistência à tração por compressão diametral, (b) energia total e (c) energia até a carga máxima	95
Figura 78. Ilustração dos dados obtidos com carregamento de 50mm/min e 1mm/min.....	96
Figura 79. Ilustração da amostra semi-circular	97
Figura 80. Configuração do ensaio de flexão em amostra semi-circular com fenda (Montestruque et al., 2010).....	98
Figura 81. Ensaio de fratura em amostras semi-circulares (a) energia total e (b) energia até a carga máxima ...	99
Figura 82. Vida de fadiga (a) misturas SPV 12,5mm (diferentes ligantes) e (b) misturas preparadas com o ligante altamente modificado	102
Figura 83. Resultado de RT para a mistura B (granulometria SPV 12,5mm e CAP 30/45)	112
Figura 84. Resultado de energia dissipada total para a mistura B (granulometria SPV 12,5mm e CAP 30/45) ..	113
Figura 85. Resultado de energia dissipada até o ponto de carga máxima para a mistura B (granulometria SPV 12,5mm e CAP 30/45)	113
Figura 86. Resultado de RT para a mistura D (granulometria SMA 8S e CAP 30/45)	114
Figura 87. Resultado de energia dissipada total para a mistura D (granulometria SMA 8S e CAP 30/45)	115
Figura 88. Resultado de energia dissipada até o ponto de carga máxima para a mistura D (granulometria SMA 8S e CAP 30/45)	115
Figura 89. Resultado de RT para a mistura E (granulometria SMA 11S e CAP 30/45)	116
Figura 90. Resultado de energia dissipada total para a mistura E (granulometria SMA 11S e CAP 30/45)	117

Figura 91. Resultado de energia dissipada até o ponto de carga máxima para a mistura E (granulometria SMA 11S e CAP 30/45)	117
Figura 92. Resultado de RT para a mistura F (granulometria GAP 12,5mm e CAP 30/45)	118
Figura 93. Resultado de energia dissipada total para a mistura F (granulometria GAP 12,5mm e CAP 30/45) ..	119
Figura 94. Resultado de energia dissipada até o ponto de carga máxima para a mistura F (granulometria GAP 12,5mm e CAP 30/45)	119
Figura 95. Resultado de RT para a mistura H (granulometria CPA 12,5mm e CAP 30/45)	120
Figura 96. Resultado de energia dissipada total para a mistura H (granulometria CPA 12,5mm e CAP 30/45) .	121
Figura 97. Resultado de energia dissipada até o ponto de carga máxima para a mistura H (granulometria CPA 12,5mm e CAP 30/45)	121
Figura 98. Resultado de RT para a mistura J (granulometria SPV 12,5mm e ligante modificado por SBS 60/85)	122
Figura 99. Resultado de energia dissipada total para a mistura J (granulometria SPV 12,5mm e ligante modificado por SBS 60/85).....	123
Figura 100. Resultado de energia dissipada até o ponto de carga máxima para a mistura J (granulometria SPV 12,5mm e ligante modificado por SBS 60/85).....	123
Figura 101. Resultado de RT para a mistura L (granulometria SMA 8S e ligante modificado por polímero SBS 60/85)	124
Figura 102. Resultado de energia dissipada total para a mistura L (granulometria SMA 8S e ligante modificado por polímero SBS 60/85)	125
Figura 103. Resultado de energia dissipada até o ponto de carga máxima para a mistura L (granulometria SMA 8S e ligante modificado por polímero SBS 60/85).....	125
Figura 104. Resultado de RT para a mistura M (granulometria SMA 11S e ligante modificado por polímero SBS 60/85)	126
Figura 105. Resultado de energia dissipada total para a mistura M (granulometria SMA 11S e ligante modificado por polímero SBS 60/85)	127
Figura 106. Resultado de energia dissipada até o ponto de carga máxima para a mistura M (granulometria SMA 11S e ligante modificado por polímero SBS 60/85).....	127
Figura 107. Resultado de RT para a mistura N (granulometria GAP 12,5mm e ligante modificado por polímero SBS 60/85)	128
Figura 108. Resultado de energia dissipada total para a mistura N (granulometria GAP 12,5mm e ligante modificado por polímero SBS 60/85)	129
Figura 109. Resultado de energia dissipada até o ponto de carga máxima para a mistura N (granulometria GAP 12,5mm e ligante modificado por polímero SBS 60/85)	129
Figura 110. Resultado de RT para a mistura P (granulometria CPA 12,5mm e ligante modificado por polímero SBS 60/85)	130
Figura 111. Resultado de energia dissipada total para a mistura P (granulometria CPA 12,5mm e ligante modificado por polímero SBS 60/85)	131

Figura 112. Resultado de energia dissipada até o ponto de carga máxima para a mistura P (granulometria CPA 12,5mm e ligante modificado por polímero SBS 60/85)	131
Figura 113. Resultado de RT para a mistura R (granulometria SPV 12,5mm e ligante modificado por borracha)	132
Figura 114. Resultado de energia dissipada total para a mistura R (granulometria SPV 12,5mm e ligante modificado por borracha)	133
Figura 115. Resultado de energia dissipada até o ponto de carga máxima para a mistura R (granulometria SPV 12,5mm e ligante modificado por borracha)	133
Figura 116. Resultado de RT para a mistura Z (granulometria SPV 12,5mm e ligante modificado por RET)	134
Figura 117. Resultado de energia dissipada total para a mistura Z (granulometria SPV 12,5mm e ligante modificado por RET)	135
Figura 118. Resultado de energia dissipada até o ponto de carga máxima para a mistura Z (granulometria SPV 12,5mm e ligante modificado por RET)	135
Figura 119. Retroanálise Faixa 1 – Segmento 1.I	137
Figura 120. Retroanálise Faixa 1 – Segmento 1.II	138
Figura 121. Retroanálise Faixa 1 – Segmento 1.III	140
Figura 122. Retroanálise Faixa 1 – Segmento 1.IV	142
Figura 123. Retroanálise Faixa 1 – Segmento 1.V	143
Figura 124. Retroanálise Faixa 1 – Segmento 1.VI	144
Figura 125. Retroanálise Faixa 1 – Segmento 2.I	145
Figura 126. Retroanálise Faixa 1 – Segmento 2.II	147
Figura 127. Retroanálise Faixa 1 – Segmento 2.III	149
Figura 128. Retroanálise Faixa 1 – Segmento 2.IV	150

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Resultados de energia dissipada obtidos para as misturas avaliadas.....	27
Tabela 2. Critérios de dosagem apresentados por BLANKENSHIP <i>et al.</i> (2004)	33
Tabela 3. Critérios de dosagem apresentados por MAKOWSKI <i>et al.</i> (2005)	33
Tabela 4. Parâmetros finais da mistura apresentados por BENNERT e MAHER (2008)	34
Tabela 5. Trechos experimentais com utilização do SAMI (BLANKENSHIP <i>et al.</i> , 2004)	35
Tabela 6. Descrição das dosagens do SAMI	48
Tabela 8. Resumo Retroanálise	74
Tabela 9. Resultados do levantamento funcional	78
Tabela 10. Proposta para uma nova designação de temperatura alta do PG para PG 64-XX	88
Tabela 11. Coeficientes da equação de fadiga	103
Tabela 12. Resultados obtidos para a mistura B (granulometria SPV 12,5mm e CAP 30/45)	112
Tabela 13. Resultados obtidos para a mistura D (granulometria SMA 8S e CAP 30/45)	114
Tabela 14. Resultados obtidos para a mistura E (granulometria SMA 11S e CAP 30/45)	116
Tabela 15. Resultados obtidos para a mistura F (granulometria GAP 12,5mm e CAP 30/45)	118
Tabela 16. Resultados obtidos para a mistura H (granulometria CPA 12,5mm e CAP 30/45)	120
Tabela 17. Resultados obtidos para a mistura J (granulometria SPV 12,5mm e ligante modificado por SBS 60/85)	122
Tabela 18. Resultados obtidos para a mistura L (granulometria SMA 8S e ligante modificado por polímero SBS 60/85)	124
Tabela 19. Resultados obtidos para a mistura M (granulometria SMA 11S e ligante modificado por polímero SBS 60/85)	126
Tabela 20. Resultados obtidos para a mistura N (granulometria GAP 12,5mm e ligante modificado por polímero SBS 60/85)	128
Tabela 21. Resultados obtidos para a mistura P (granulometria CPA 12,5mm e ligante modificado por polímero SBS 60/85)	130
Tabela 22. Resultados obtidos para a mistura R (granulometria SPV 12,5mm e ligante modificado por borracha)	132
Tabela 23. Resultados obtidos para a mistura Z (granulometria SPV 12,5mm e ligante modificado por RET) ...	134

1. CONCESSIONÁRIA

Autopista Régis Bittencourt

2. DESCRIÇÃO DO PROJETO

2.1 TÍTULO DO PROJETO

Avaliação da Relação entre a Energia Conservada e Fadiga / Deformação Permanente –
PARTE 2

2.2 OBJETIVO

- **Objetivo Geral**

O objetivo central desta pesquisa é compreender o comportamento mecânico de misturas asfálticas a quente executadas como revestimento de pavimentos, levando em consideração resultados laboratoriais obtidos de energia dissipada e de propriedades mecânicas, além de dados de monitoramento de algumas pistas teste escolhidas a partir de ensaios de laboratório. Tem-se por meta compreender as tensões atuantes e energia dissipada em pavimentos trincados restaurados por fresagem e recomposição parcial e por execução de camada anti reflexão de trincas (*Stress Absorbing Membrane Interlayer* - SAMI).

- **Objetivos Específicos**

Em 2010, iniciou-se a PARTE 1 desta pesquisa, dentro do 'PROJETO 02 - SGP/ARB_02 REV.01', com o cálculo da energia dissipada em ensaios de resistência à tração por compressão diametral e de determinação de propriedades mecânicas de diferentes misturas propostas. Na PARTE 2 deste projeto, são analisados os resultados obtidos em pistas testes, cujas estruturas propostas são baseadas nos resultados obtidos na PARTE 1, além da realização de ensaios complementares de laboratório. A meta é ampliar a vida útil do pavimento, reduzindo o problema de reflexão de trincas, a partir de restauração parcial da estrutura, por meio de soluções embasadas nas propriedades mecânicas de dissipação de energia das misturas asfálticas e dos mecanismos de fratura envolvidos. Para tanto, têm-se como objetivos específicos:

- Análise de resultados de laboratório obtidos na PARTE 1 desta pesquisa (projeto realizado em 2010);

- Análise de dados de levantamento deflectométrico de pista e estado de superfície de trechos de interesse de restauração na Rodovia Régis Bittencourt para avaliar a possibilidade de execução de soluções baseadas nos resultados da PARTE 1;
- Definição de trechos experimentais de restauração de pavimentos;
- Realização de ensaios complementares e confirmatórios de propriedades mecânicas de misturas asfálticas, baseados nas tecnologias disponíveis e de mecânica da fratura;
- Análise e monitoramento de pista experimental.

3. JUSTIFICATIVA

Tendo em vista que muitos pavimentos asfálticos têm apresentado precocemente trincamento por fadiga e que a construção de reforços sobre pavimentos trincados tem levado à rápida reflexão destes padrões de trincamento pré-existent nas camadas remanescentes, vem-se buscando novas tecnologias para retardar estes problemas.

Tem-se buscado a restauração a partir de técnicas e materiais que retardem o trincamento por fadiga e a reflexão de trincas de camadas subjacentes. Frequentemente adota-se como solução para a restauração de pavimentos deteriorados por trincamento a sobreposição de camadas em material asfáltico denso, no intuito de impermeabilizar o pavimento, reduzir a irregularidade e aumentar a vida útil do pavimento; esta técnica implica, no entanto, em problemas adicionais tais como alteração no greide, alteração nas declividades necessárias ao sistema de drenagem, além do desperdício de material nobre, que rapidamente sofre deterioração pelas trincas presentes no revestimento remanescente, que tendem a refletir na nova camada de mistura asfáltica.

Da mesma forma, a fresagem e recomposição de espessura parcial da camada trincada tem sido adotada como medida paliativa no tratamento do trincamento, apesar da baixa expectativa de vida da técnica; pesquisas internacionais tem mostrado que é necessária a substituição de 70% da espessura da camada trincada para que a mitigação na reflexão de trincas seja efetiva. Neste contexto, uma compreensão acerca das energias relacionadas à absorção e dissipação de tensões se apresenta como parâmetro fundamental para a determinação de espessura a ser tratada.

O trincamento generalizado de revestimentos asfálticos pode simplificarmente ser atribuído (i) à fadiga do próprio material asfáltico em pavimentos com base de comportamento puramente granular, ou (ii) à reflexão de trincas de camadas subjacentes em ruína em pavimentos com bases cimentadas. A indicação do processo de restauração mais eficiente depende da identificação das causas do trincamento. Soluções combinadas podem ser introduzidas com o objetivo de melhorar o problema de reflexões dessas trincas, como por exemplo, o uso de camada intermediária entre o pavimento trincado e o revestimento, comumente chamado de SAMI.

4. DESENVOLVIMENTO DO PROJETO

- **Métodos e Técnicas Utilizadas**

Para atender aos objetivos propostos, este projeto prevê a realização de ensaios de laboratório no CDT- Centro de Desenvolvimento Tecnológico e no Laboratório de Tecnologia de Pavimentação da EPUSP, segundo as especificações da AASHTO/ASTM e do DNIT. Os ensaios de laboratório estão divididos em três grupos:

- (i) Misturas Asfálticas Densas preparadas em laboratório (SPV, SMA, GAP);
- (ii) Mistura de Camada Anti-Reflexão de Trincas (SAMI), preparadas em laboratório;
- (iii) Misturas executadas no trecho experimental.

Nos estudos laboratoriais são realizados ensaios de comportamento mecânico considerando as peculiaridades das misturas avaliadas na pesquisa. Os ensaios de resistência à tração são realizados em diferentes temperaturas, e a partir das curvas carga X deformação, são obtidos os valores de energia dissipada. Também é avaliada a alteração na velocidade de carregamento da prensa (1mm/min) a fim de melhor quantificar o efeito do ligante asfáltico na resposta da mistura.

Os ensaios de fadiga são realizados em amostras cilíndricas por aplicação de carga diametral com tensão controlada e os resultados são confrontados com os dados de energia dissipada, como indicador de comportamento. A mecânica da fratura é avaliada em amostras semi-circulares com fenda, de modo que se possa identificar as características de resistência à abertura e propagação de trincas nas misturas.

Ensaio para determinação do módulo de resiliência são realizados em amostras de misturas moldadas em laboratório e em misturas executadas em campo, permitindo o confronto dos valores obtidos por ensaio em laboratório com os módulos efetivos das camadas na estrutura do pavimento.

A pesquisa contempla a execução de trecho experimental no qual são indicadas diferentes soluções que permitam a comparação entre alternativas convencionais e alternativas propostas com base nos resultados deste estudo. A conformação dos segmentos permite ainda que sejam realizadas avaliações sobre estruturas com diferentes configurações de base existentes. Os trechos experimentais foram executados na pista Norte entre o km 435+600 e o km 434+880, nas duas faixas de rolamento, ampliando a base de dados para análise.

4.1 RELATÓRIO DE ACOMPANHAMENTO I (Abril/2011)

No Relatório de Acompanhamento I (Abril/2011) foi apresentado:

- Seleção das 12 misturas asfálticas (a partir dos resultados obtidos na PARTE 1) para uma investigação mais detalhada no que diz respeito à resistência a tração por compressão diametral.
- Resultados de resistência à tração por compressão diametral e cálculo das energias dissipadas de 5 das 12 misturas (B, D, E, J e Z) para as temperaturas de 15°C e 35°C.

4.2 RELATÓRIO DE ACOMPANHAMENTO II (Julho/2011)

No Relatório de Acompanhamento II (Julho/2011) foi apresentado:

- O resultado do ensaio de resistência à tração por compressão diametral (e cálculo da energia dissipada) para as 7 misturas asfálticas restantes nas temperaturas de 15°C e 35°C, completando as 12 misturas previstas. A partir desses resultados foi possível selecionar as misturas que apresentaram melhores resultados e que iriam compor a camada superior dos trechos experimentais (misturas asfálticas densas).
- Uma revisão bibliográfica sobre Camada Asfáltica Intermediária Anti-Reflexão de Trincas (conhecida internacionalmente como SAMI) com enfoque no procedimento de dosagem. Muitos dos trabalhos que foram publicados sobre esse tipo de mistura não apresentam os detalhes de como a mistura final foi proposta, nem os parâmetros utilizados, mas os artigos citados nas referências do Relatório de

Acompanhamento II guiaram os primeiros passos dados para o procedimento de dosagem adotado nestapesquisa.

4.3 RELATÓRIO DE ACOMPANHAMENTO III (Outubro/2011)

No Relatório de Acompanhamento III (Outubro/2011) foram apresentados (as):

- As primeiras tentativas do projeto de mistura da camada anti-reflexão de trincas (SAMI). Para as duas tentativas iniciais, realizou-se ensaios para determinação dos parâmetros volumétricos, parâmetros de densificação, módulo de resiliência e resistência à tração modificado para cálculo dos parâmetros de energia dissipada. Verificou-se que durante o projeto da mistura, a variação de 50 para 75 giros não teve grande influência nos parâmetros avaliados.
- Uma revisão bibliográfica sobre a espessura adequada para aplicação do SAMI em campo. Verificou-se na maior parte dos trabalhos encontrados, que esse tipo de mistura asfáltica é aplicada em camada com aproximadamente 2,5cm de espessura.
- Uma primeira proposta para a estrutura dos trechos experimentais, ilustrada na Figura 20 do Relatório de Acompanhamento III.

4.4 RELATÓRIO DE ACOMPANHAMENTO IV (Janeiro/2012)

No Relatório de Acompanhamento IV (Janeiro/2012) foi apresentado (a):

- Análise das tentativas de dosagem do SAMI, com relação ao efeito: (i) do fracionamento peneira e peneira, (ii) da forma de compactação – 75 giros versus 75 golpes, e (iii) do tipo de ligante.
- Definição da estrutura dos trechos experimentais a serem executados na Rodovia Régis Bittencourt, de forma a: (i) quantificar a eficiência do SAMI (sob diferentes condições de suporte), e (ii) diferenciar as respostas de camadas asfálticas preparadas com ligante SBS e com ligante HiMA.

4.5 RELATÓRIO DE ACOMPANHAMENTO V (Abril/2012)

No Relatório de Acompanhamento V (Abril/2012) foi apresentado (a):

- Projeto final de dosagem do SAMI utilizando ligante asfáltico altamente modificado (HiMA);
- 'As Built' dos trechos experimentais executados na Rodovia Régis Bittencourt;
- Descrição do processo executivo (especialmente da produção do SAMI) e do controle tecnológico da obra (controle da temperatura das massas asfálticas, controle deflectométrico antes e após a obra, e verificação do teor de ligante e da granulometria).

4.6 RELATÓRIO DE ACOMPANHAMENTO VI (Julho/2012)

No Relatório de Acompanhamento VI (Julho/2012) foi apresentado (a):

- Ensaios reológicos nos dois ligantes asfálticos utilizados nas misturas executadas no trecho experimental (SAMI e SPV19mm);
- Ensaios de aderência entre camadas (Leutner);
- Parâmetros volumétricos, ensaio de módulo de resiliência e resistência à tração de CPs extraídos do trecho experimental; e
- Levantamento deflectométrico nos trechos experimentais.

4.7 RELATÓRIO DE ACOMPANHAMENTO VII (Outubro/2012)

No Relatório de Acompanhamento VII (Outubro/2012) foi apresentado (a):

- Retroanálise dos dados de bacia de deflexão (FDW) para os segmentos do Trecho Experimental; e
- Ensaios na mistura SPV 19mm CAP 30/45 - parâmetros volumétricos, módulo de resiliência, resistência à tração por compressão diametral (com cálculo da energia dissipada), e ensaio de fadiga (compressão diametral) para quatro níveis de tensão.

4.8 RELATÓRIO FINAL DE ACOMPANHAMENTO VIII (Janeiro/2013)

Uma vez que este Relatório é a conclusão de um projeto de pesquisa, ele apresenta todas as fases do trabalho de maneira a mostrar e embasar as conclusões mais importantes sobre o tema em foco.

5. AVALIAÇÃO DAS MISTURAS ASFÁLTICAS DA PARTE 1 DO PROJETO

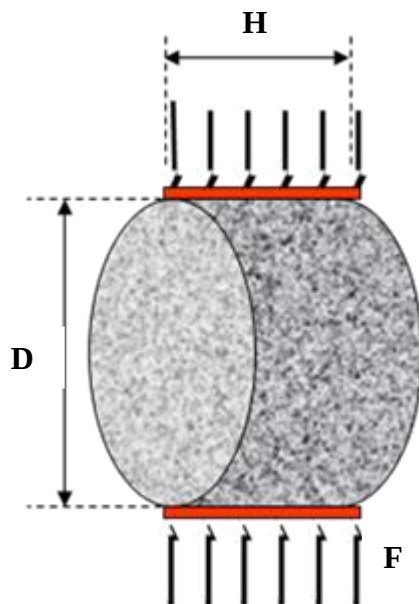
Esta pesquisa, composta por duas etapas interligadas, contemplou a realização de ensaios sobre diferentes misturas, com vistas ao comportamento mecânico, no intuito de se determinar em laboratório o potencial de desempenho em pista. Foram avaliadas, inicialmente, 32 misturas com características distintas de distribuição granulométrica e diferentes ligantes asfálticos. Das 32 misturas, 12 foram selecionadas a partir dos resultados obtidos na PARTE 1 para uma investigação mais detalhada no que diz respeito à resistência a tração por compressão diametral e ensaios de fratura. As misturas selecionadas estão ilustradas na **Figura 1**, em cinza. Foram mantidas as mesmas dosagens realizadas na PARTE 1. Na PARTE 1, corpos de prova foram ensaiados a 5°C e 25°. Para a PARTE 2, as 12 misturas asfálticas selecionadas foram testadas a 15°C e 35°C, a fim de se obter uma estimativa do comportamento mecânico das mesmas para um espectro mais amplo de temperaturas.

	CAP 30/45	SBS 60/85	BORRACHA	RET
SPV9,5mm	A	I	Q	Y
SPV12,5mm	B	J	R	Z
SPV19mm	C	K	S	AA
SMA8S	D	L	T	BB
SMA11S	E	M	U	CC
GAP12,5mm	F	N	V	DD
CPA9,5mm	G	O	W	EE
CPA12,5mm	H	P	X	FF

Figura 1. Misturas asfálticas selecionadas para investigação da PARTE 2 do projeto

Seguindo a norma ABNT (2004) NBR 15087 – Misturas asfálticas – Determinação da resistência à tração por compressão diametral – Associação Brasileira de Normas Técnicas, foram realizadas medidas de resistência à tração (**Figura 2**), a partir das quais foram definidas as energias dissipadas no ensaio para cada mistura. As medidas de energia

dissipada foram avaliadas comparativamente ao módulo de resiliência, como medida de rigidez, e à resistência à deformação permanente.



(a)

$$RT = \frac{2 F}{\pi D H}$$



(b)

(a) Princípio de aplicação de carga para a Ruptura

(b) Corpo-de-prova rompido após término do ensaio

Figura 2. Ensaio de resistência à tração por compressão diametral – princípios do ensaio

Os seguintes dados (**Figura 3**) são obtidos a partir do ensaio: (i) resistência à tração por compressão diametral modificada (RTm); (ii) carga máxima (Pmax); (iii) deslocamento até o ponto de carga máxima (d@Pmax); (iv) energia total dissipada (Energia_{total}); (v) energia dissipada até o ponto de carga máxima (Energia_{Pmax}).

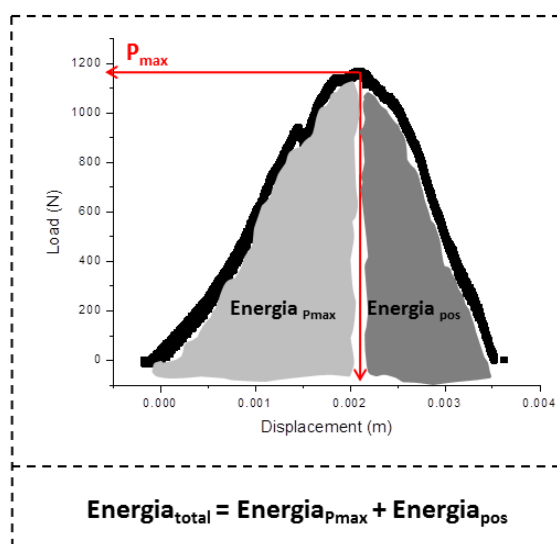


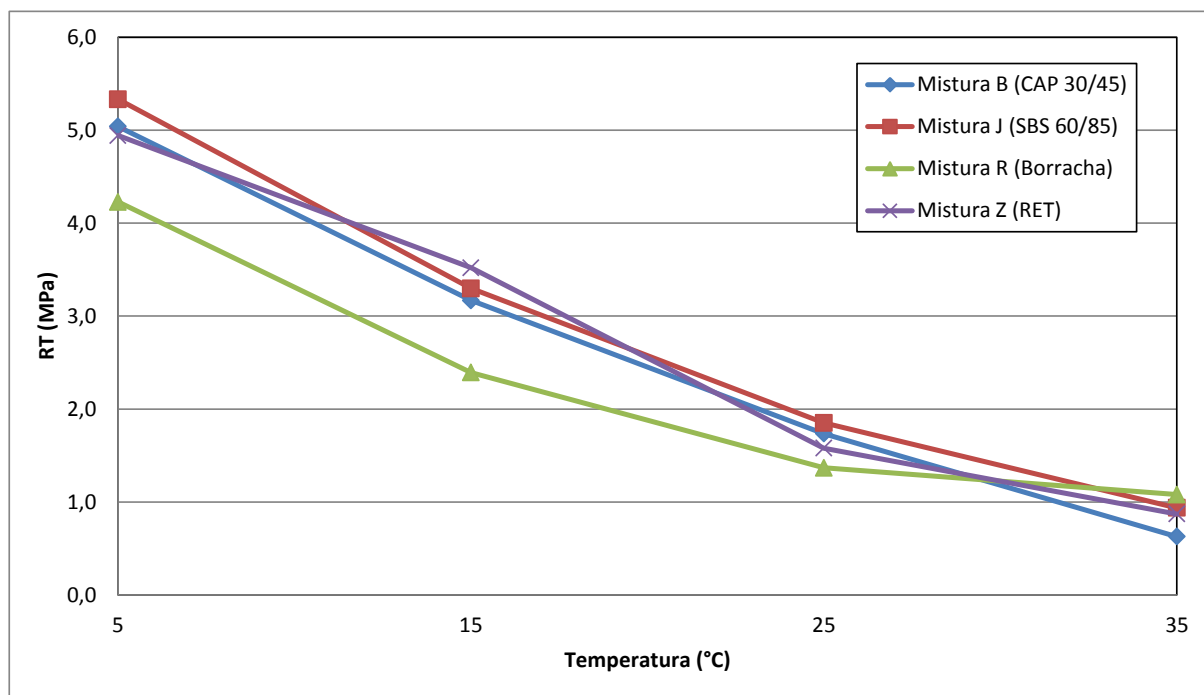
Figura 3. Ilustração dos parâmetros obtidos do ensaio de resistência à tração por compressão diametral modificado

Todos os dados obtidos para as 12 misturas asfálticas avaliadas encontram-se no **ANEXO A** deste relatório. Para facilitar um comparativo entre elas, os dados foram agrupados, conforme a seguir.

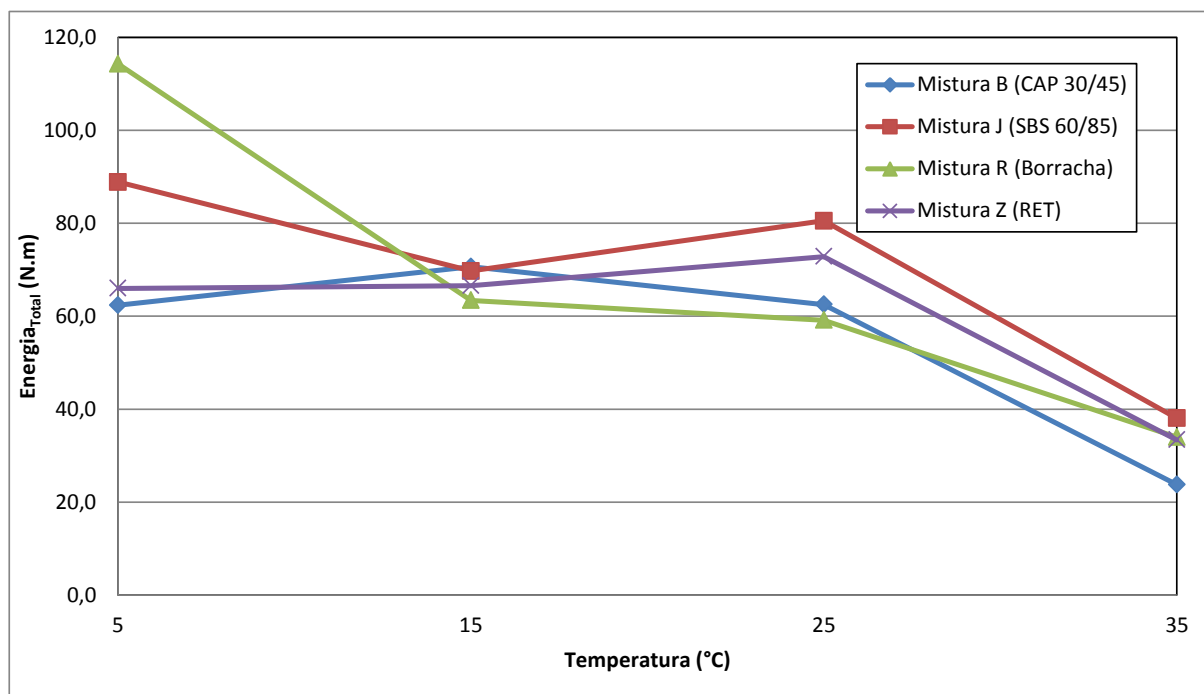
A **Figura 4** apresenta uma comparação entre diferentes ligantes asfálticos, sendo mantida a mesma granulometria (SPV 12,5mm). Dos dados apresentados, conclui-se:

- Resistência à Tração por Compressão Diametral: ligantes modificados com SBS e RET deram resultados similares. Para o CAP 30/45, os valores são da mesma ordem de grandeza. O CAP Borracha apresentou resultados de resistência (de pico) menores, porém esta propriedade mecânica é menos susceptível à variação de temperatura em relação aos demais.
- Energia Dissipada: de maneira geral, as energias dissipadas totais a 5, 15 e 25°C estão da mesma ordem de grandeza para todos os ligantes, reduzindo sensivelmente a 35°C. A 35°C, o CAP 30/45 apresentou o menor valor de energia dissipada, correspondendo, aproximadamente, à metade dos demais, comprovando mais uma vez que adição de

polímeros ou aditivos que aumentam o retorno elástico contribui para a manutenção de maiores valores de energia dissipada a temperaturas mais elevadas.



(a)

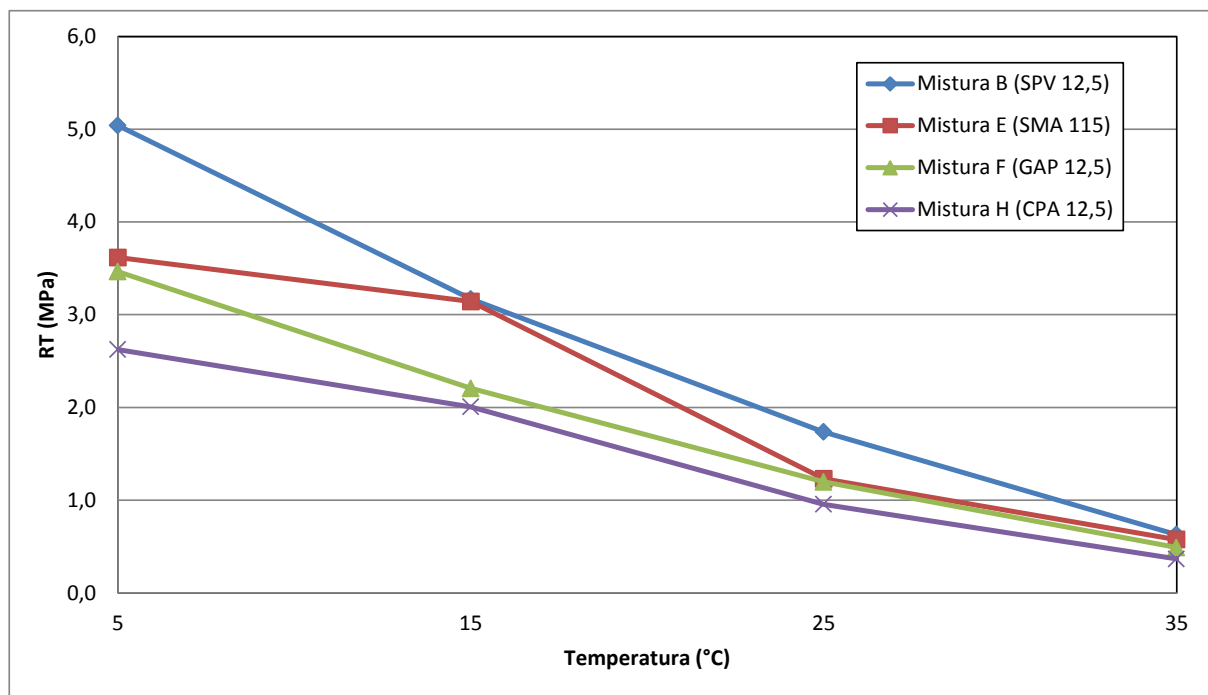


(b)

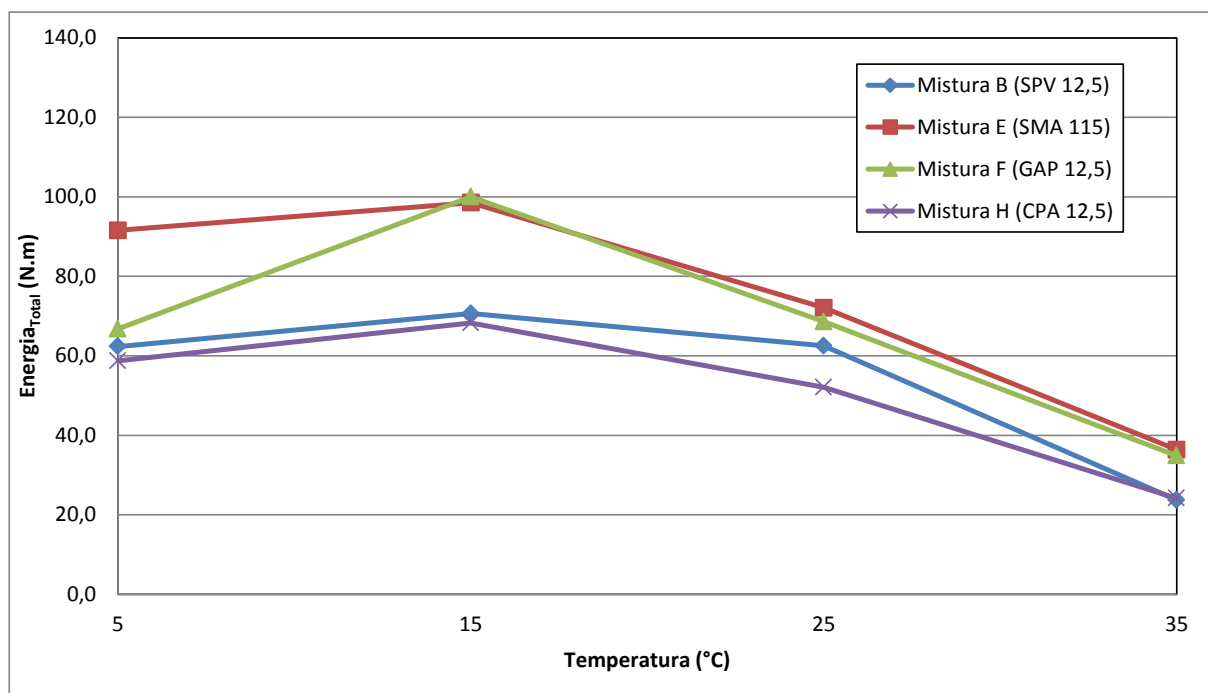
Figura 4. Comparativo entre diferentes ligantes asfálticos

A **Figura 5** apresenta uma comparação entre diferentes granulometrias, sendo mantido o mesmo ligante asfáltico (CAP 30/45). Dos dados apresentados conclui-se:

- Resistência à Tração por Compressão Diametral: como esperado, o CPA apresentou o menor valor de RT por possuir o maior volume de vazios, estando a mistura SPV12,5mm (contínua e bem graduada) com os resultados mais elevados. As misturas de SMA e GAP, conforme aponta a literatura, apresentaram resultados semelhantes entre si e inferiores aos da mistura SPV 12,5mm, por serem descontínuas.
- Energia Dissipada: em termos de energias, as misturas descontínuas apresentaram maiores valores de energia dissipada, mostrando os benefícios de uso de revestimentos asfálticos descontínuos. Da mesma forma, a mistura de CPA apresentou piores resultados, conforme era esperado e foi mencionado acima.

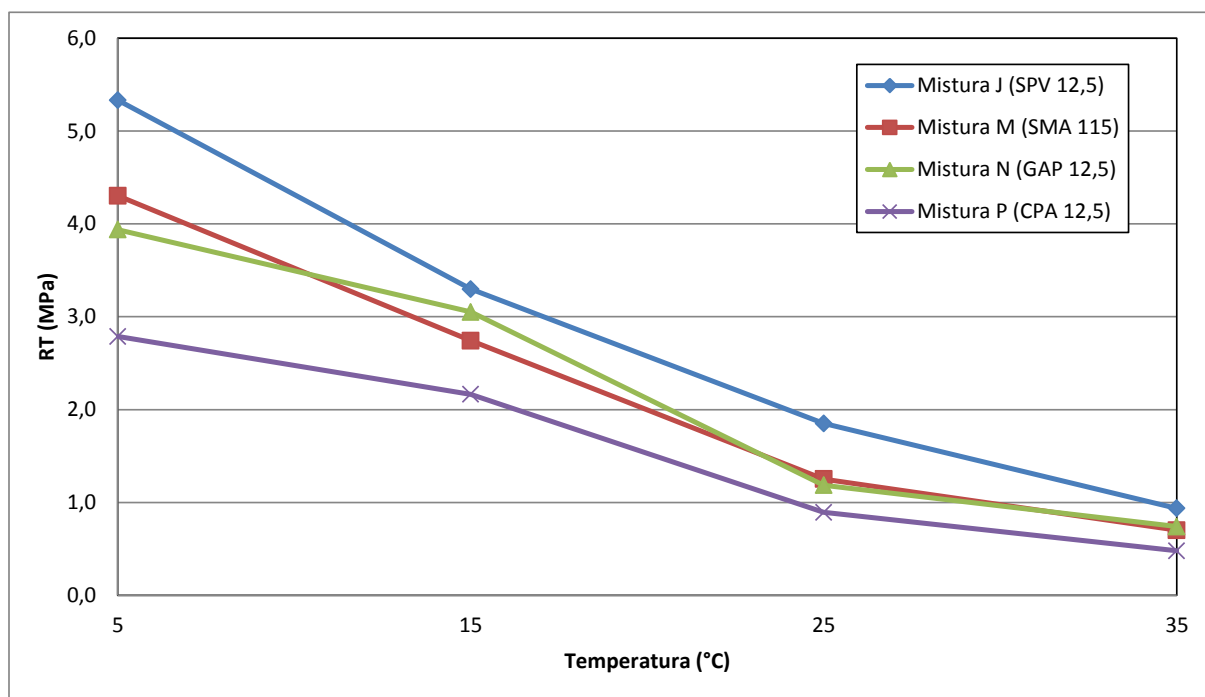


(a)

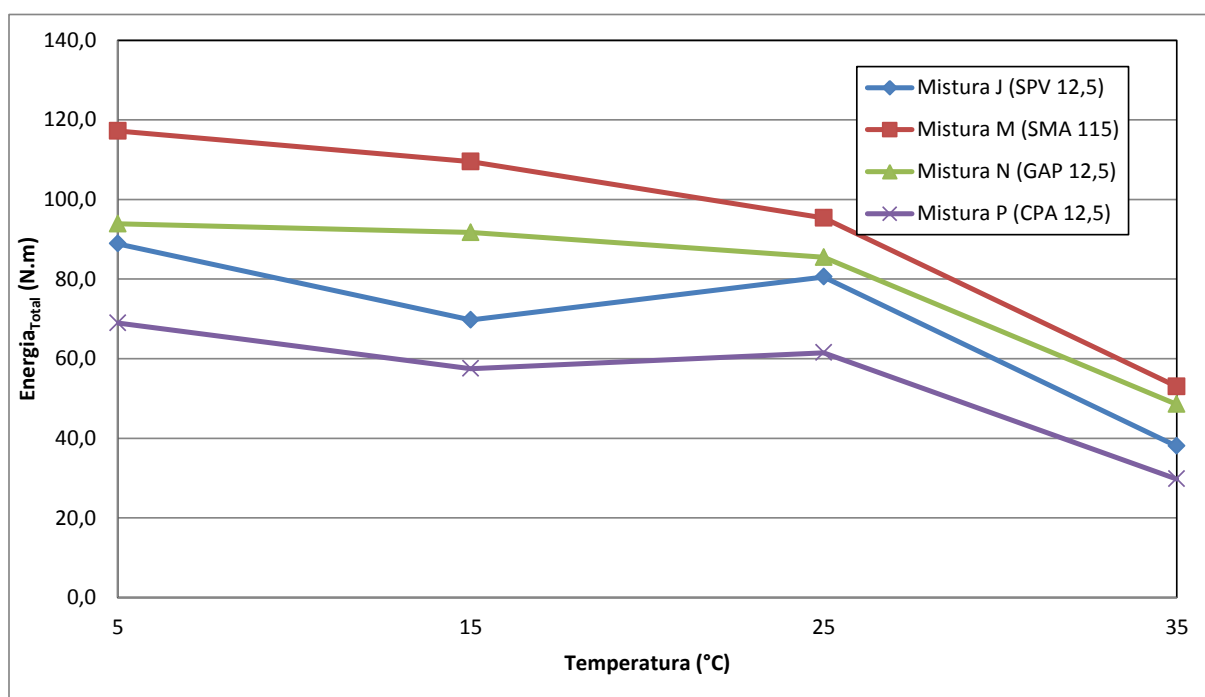


(b)

Figura 5. Comparativo entre diferentes granulometrias, utilizando o CAP 30/45



(a)



(b)

Figura 6. Comparativo entre diferentes granulometrias, utilizando o ligante SBS 60/85

Comparação entre o CAP 30/45 e SBS (para diferentes granulometrias):

Observaram-se valores semelhantes de RT (para uma mesma granulometria) para os dois ligantes asfálticos, porém os valores de energia dissipada para o CAP modificado mostraram-se um pouco superiores.

Comparação entre Energia Dissipada e RT:

Não foi observada correlação entre os valores de RT e as energias dissipadas para as 4 temperaturas avaliadas (5, 15, 25 e 35°C).

Procedimento adaptado para avaliação da Energia Dissipada

O procedimento para a obtenção da energia dissipada a partir da curva de carga X deslocamento, no ensaio de resistência à tração, foi adaptado em virtude de características de corpos de prova e necessidades de padronização dos cálculos. As misturas apresentam de modo evidente, variação entre a deformação total sofrida durante o ensaio e até a ruptura, além da alteração na resistência de pico, como foi visto anteriormente. No final do ensaio, existe ainda uma alteração importante na leitura dos resultados, conforme se observa na **Figura 7**, que podem gerar dificuldade de cálculo e, portanto, de comparação entre misturas asfálticas. A partir de determinado ponto de deslocamento, que depende da mistura e do arranjo de ensaio, a área abaixo da curva de carga versus deslocamento deve ser medida e sofre uma normalização para o cálculo da energia dissipada. A normalização é feita dividindo-se os parâmetros pela área de ruptura provável do corpo-de-prova. Este artifício foi feito, pois os corpos-de-prova têm alturas diferentes e este fator poderia distorcer os resultados.

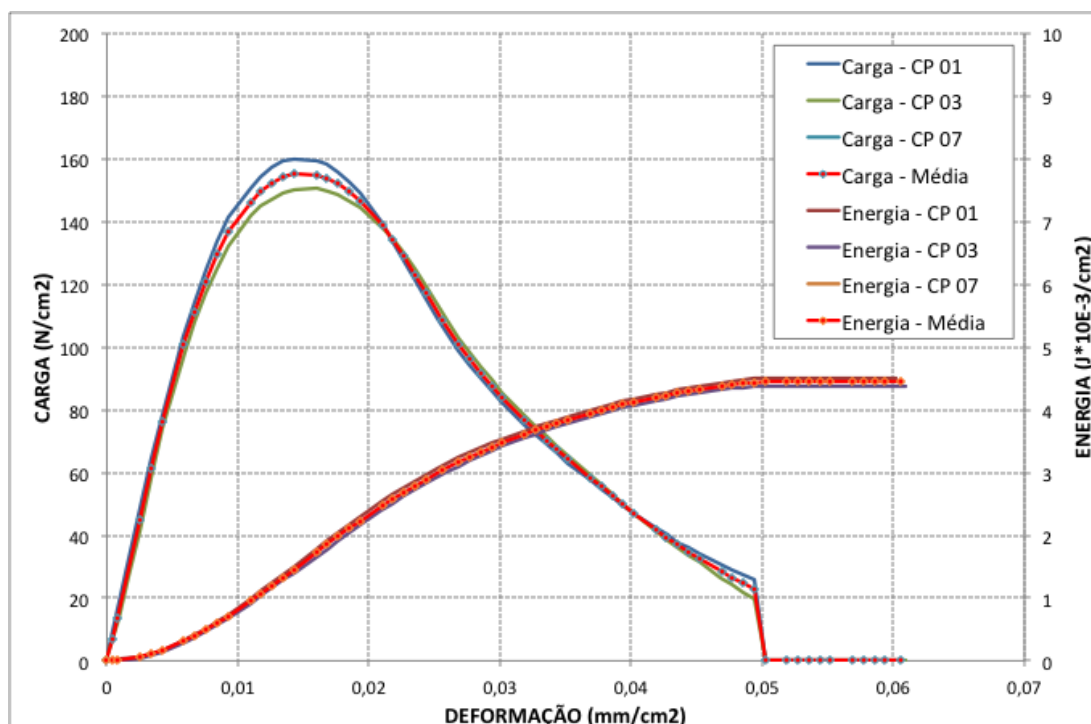


Figura 7. Cálculo padronizado de energia dissipada a partir da curva obtida no ensaio de resistência à tração

Para ilustrar os procedimentos realizados, a Figura 8 mostra a necessidade de exclusão de resultados que não seguem um mesmo padrão de deslocamento frente à carga. As Figuras 9 e 10 mostram exemplos de ensaios em misturas asfálticas com respostas bastante distintas. Na Figura 9, as misturas são de baixa resistência à tração e elevado deslocamento até o final de ensaio; já na mistura da Figura 10, a resistência de pico é mais elevada, porém o final de ensaio é de baixo deslocamento.

Este ponto de parada do ensaio de ruptura, conforme se verificou durante a realização dos ensaios, coincide com a penetração parcial da barra de distribuição de carga no corpo de prova, cuja face lateral cede à pressão no ponto de contato. Definiu-se, portanto, que a partir deste ponto, a medida de energia deve ser desconsiderada. Entretanto, em virtude de importantes variações no início das deturpações mencionadas, em função do tipo de mistura, definiu-se que o ponto final para todas as misturas deve ser na deformação de 5mm, permitindo a comparação direta entre misturas diferentes. Conforme se observa na figura, a exclusão de dados discrepantes também deve ser realizada de modo criterioso, conforme indicado para tratamentos estatísticos, cabendo ao pesquisador julgar

adequadamente quando o dado discrepante traduz um comportamento, ou deve ser atribuído a viéses independentes das variáveis controladas durante a realização do ensaio. As Figuras ilustram as diferenças entre misturas de natureza e comportamento distintos.

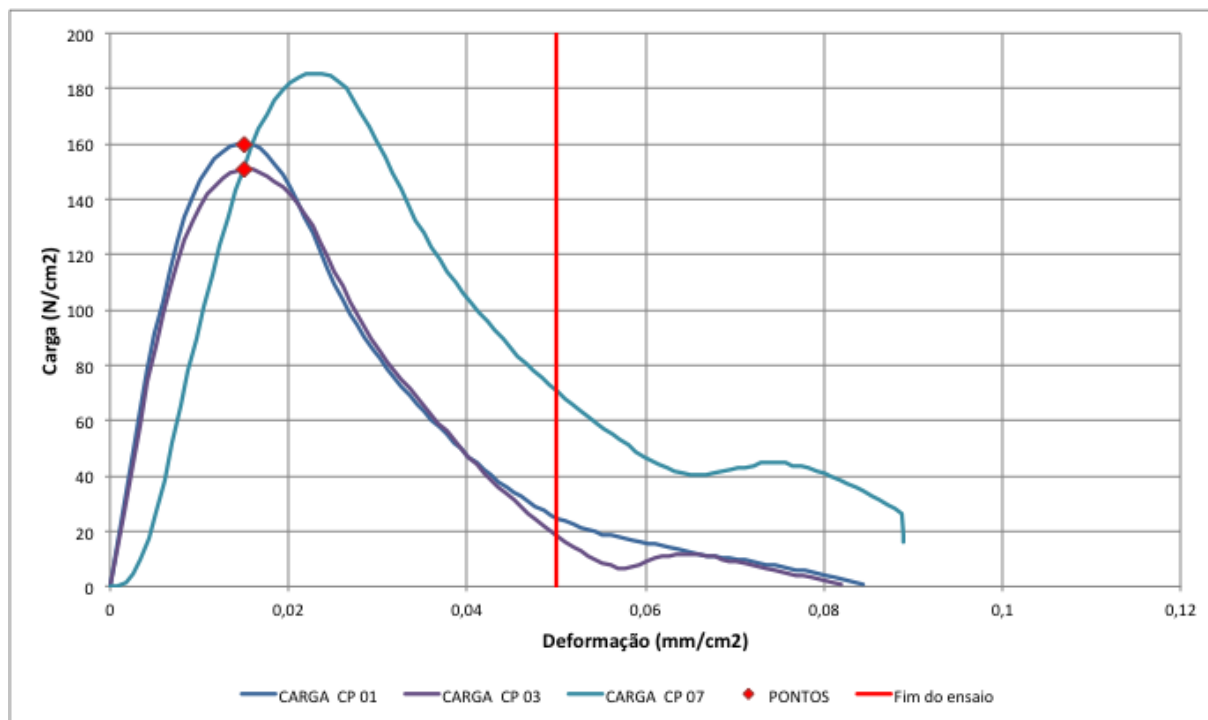


Figura 8. Mistura com resultado discrepante em relação às demais e excluída da avaliação

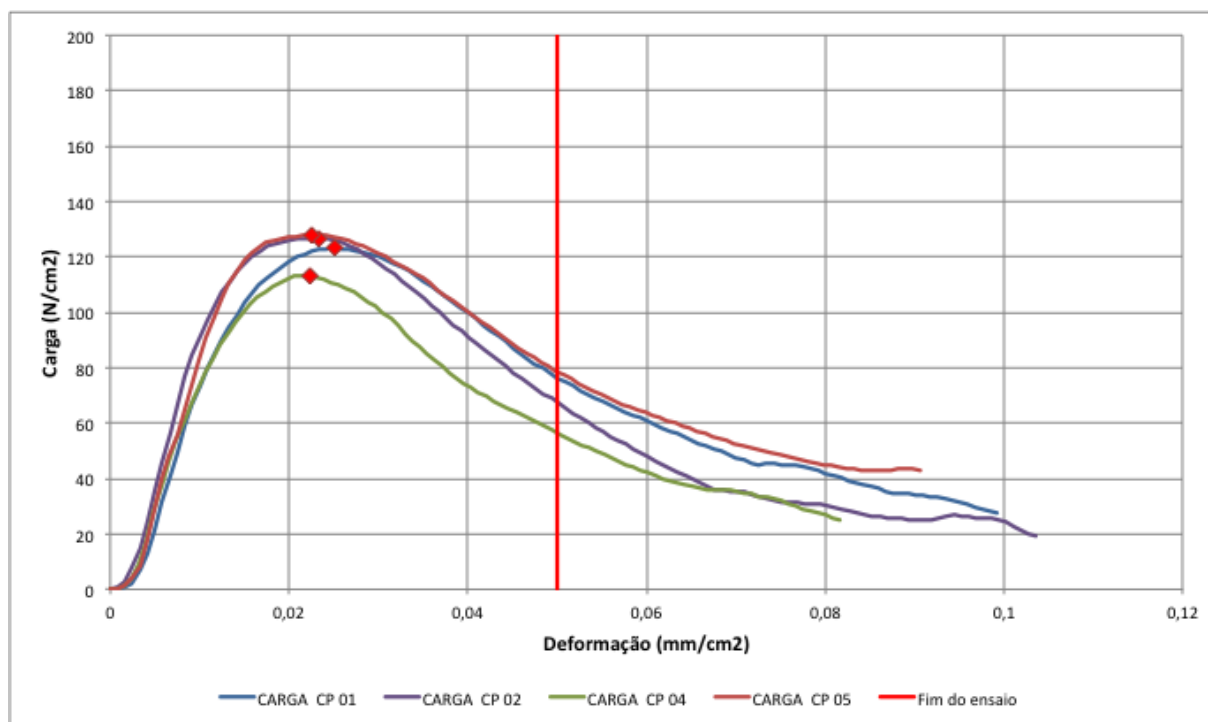


Figura 9. Mistura E – Elevada deformação e baixa resistência à tração

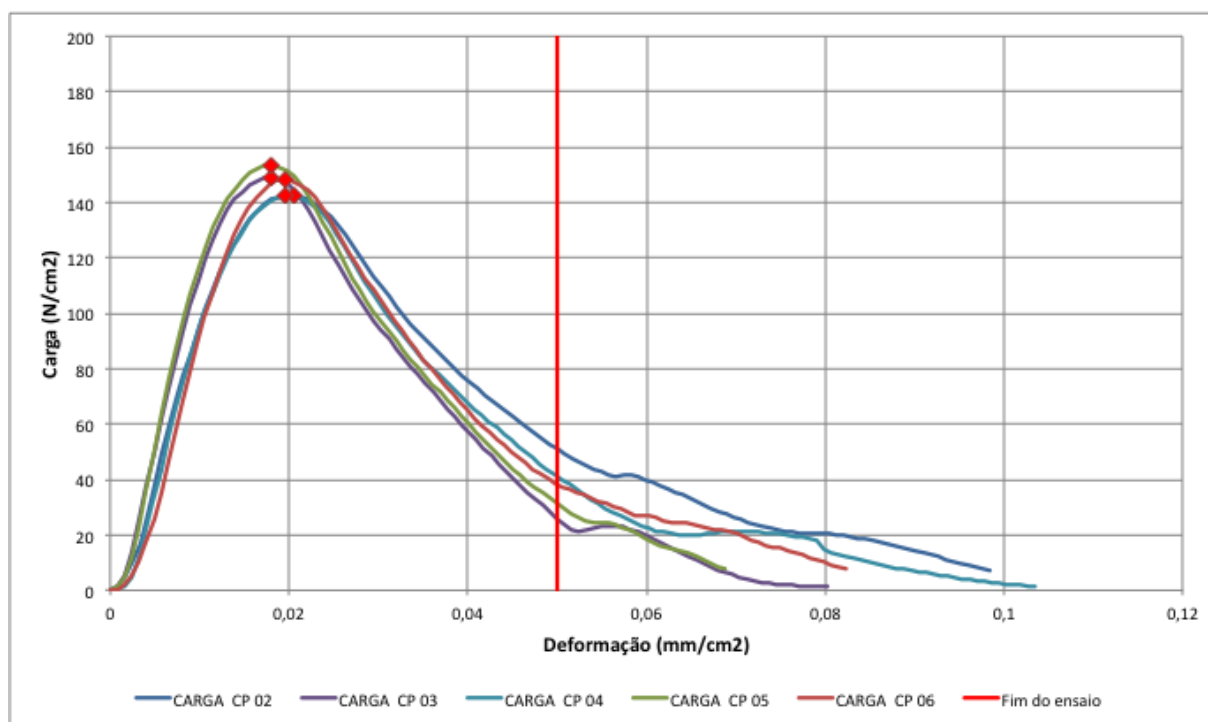


Figura 10. Mistura Q – Deformação limitada a 5 mm

A Tabela 1 apresenta os resultados obtidos para todas as misturas avaliadas, com medidas de energia dissipada realizadas a partir do referido procedimento. Os resultados apresentados referem-se aos ensaios com todas as 32 misturas à temperatura normatizada de 25°C, sendo avaliadas especificamente: (i) a energia até o ponto de carga máxima, onde ocorre a ruptura, (ii) energia após a ruptura e (iii) energia total, somando as duas últimas.

Tabela 1. Resultados de energia dissipada obtidos para as misturas avaliadas

MISTURA	CARGA MÁXIMA	DESLOCAMENTO MÁXIMO ADOTADO	DESLOCAMENTO MÁXIMO ATINGIDO	DESLOCAMENTO NA RUPTURA	ENERGIA TOTAL	ENERGIA ATÉ RUPTURA	ENERGIA APÓS RUPTURA	MR
	N/cm ²	mm/cm ²	mm/cm ²	mm/cm ²	J *10 ³ /cm ²	J *10 ³ /cm ²	J *10 ³ /cm ²	MPa
(A)	176,9	0,050	0,091	0,0229	5,239	2,254	2,984	4.400
(B)	155,4	0,050	0,083	0,0151	4,458	1,591	2,867	4.400
(C)	140,7	0,050	0,098	0,0172	4,606	1,558	3,048	3.900
(D)	113,6	0,050	0,092	0,0253	4,403	1,988	2,416	3.000
(E)	122,8	0,050	0,094	0,0233	4,450	1,794	2,656	3.200
(F)	119,5	0,050	0,089	0,0248	4,118	1,675	2,443	2.700
(G)	92,0	0,050	0,121	0,0231	3,305	1,312	1,993	2.400
(H)	95,4	0,050	0,090	0,0197	3,261	1,107	2,154	2.500
(I)	188,5	0,050	0,094	0,0254	6,315	2,795	3,520	4.500
(J)	190,6	0,050	0,091	0,0232	6,173	2,506	3,667	4.300
(K)	180,5	0,050	0,092	0,0236	5,914	2,365	3,549	4.200
(L)	116,0	0,050	0,155	0,0317	4,565	2,508	2,057	2.300
(M)	129,9	0,050	0,151	0,0263	4,910	2,106	2,803	2.700
(N)	118,6	0,050	0,092	0,0271	4,590	2,113	2,477	2.700
(O)	75,9	0,050	0,090	0,0293	3,055	1,544	1,511	1.800
(P)	89,4	0,050	0,142	0,0268	3,461	1,598	1,863	2.100
(Q)	147,2	0,050	0,087	0,0192	4,394	1,646	2,748	3.800
(R)	136,7	0,050	0,101	0,0194	4,350	1,568	2,782	3.700
(S)	111,6	0,050	0,134	0,0203	3,906	1,338	2,568	2.800
(T)	100,9	0,050	0,162	0,0247	3,986	1,646	2,340	2.400
(U)	97,2	0,050	0,162	0,0258	3,704	1,587	2,117	2.000
(V)	114,0	0,050	0,090	0,0213	4,025	1,524	2,501	2.600
(W)	64,0	0,050	0,148	0,0206	2,266	0,819	1,447	1.700
(X)	62,5	0,050	0,138	0,0193	2,225	0,748	1,477	1.600
(Y)	167,8	0,050	0,120	0,0211	5,585	2,174	3,411	4.300
(Z)	156,3	0,050	0,124	0,0195	5,073	1,905	3,168	3.500
(AA)	153,1	0,050	0,096	0,0194	4,765	1,742	3,024	3.800
(BB)	126,8	0,050	0,089	0,0213	4,708	1,804	2,904	3.100
(CC)	149,0	0,050	0,090	0,0209	5,291	1,978	3,313	3.400
(DD)	134,3	0,050	0,093	0,0219	4,720	1,787	2,933	3.000
(EE)	116,3	0,050	0,083	0,0175	3,474	1,221	2,253	2.700
(FF)	112,5	0,050	0,115	0,0171	3,395	1,085	2,309	2.600

Diferentes comparações indicaram comportamentos característicos a partir dos resultados apresentados, conforme segue:

- Misturas SPV - A comparação da distribuição granulométrica, para um mesmo tipo de ligante, mostrou que as misturas bem distribuídas e densas, apresentam comportamento maior módulo de resiliência, e elevada energia dissipada. O teor de ligante tende a ser maior para misturas mais finas, devido à maior superfície específica, entretanto, em misturas sem

diferença no teor, o comportamento permanece bom, podendo estar associado ao volume de vazios que é sempre o mesmo entre as misturas. Pode-se desta forma hierarquizar as misturas na sequência: SPV 9,5 mm, SPV 12,5 mm e SPV 19 mm.

- Misturas SMA – Observou-se que a resistência à ruptura é menor para misturas do tipo SMA do que para misturas SPV, entretanto, há diferença pronunciada na deformação sofrida ao longo do processo de aplicação de carga. Essa característica é um importante indicativo do comportamento de misturas SMA, onde se espera que por ter maior teor de ligante, deva apresentar maior vida de fadiga.

- Misturas CPA – Sendo de conhecimento geral, as misturas do tipo CPA apresentam características de rigidez muito inferiores às misturas densas, devido ao elevado volume de vazios. Esse comportamento se manteve evidente na realização de ensaios de módulo de resiliência, de resistência à tração e, conseqüentemente, nos resultados de energia dissipada. Observou-se a partir dos ensaios realizados sobre estas misturas que a baixa energia dissipada é um indicativo da também baixa rigidez. Entretanto, cabe ressaltar que as misturas CPA apresentam aplicabilidade bastante específica, sendo mais indicado buscar indicadores de desempenho a partir de ensaios complementares, fora do escopo desta pesquisa.

Foram comparados também, os resultados de módulo de resiliência e resistência à tração das misturas, a fim de verificar a validade de correlações existentes entre os ensaios. A **Figura 11** apresenta a correlação com $R^2 = 0,94$. Mostrando validade estatística. O resultado é uma contribuição por se tratar de um experimento com misturas com diferentes distribuições granulométricas e tipos de ligante.

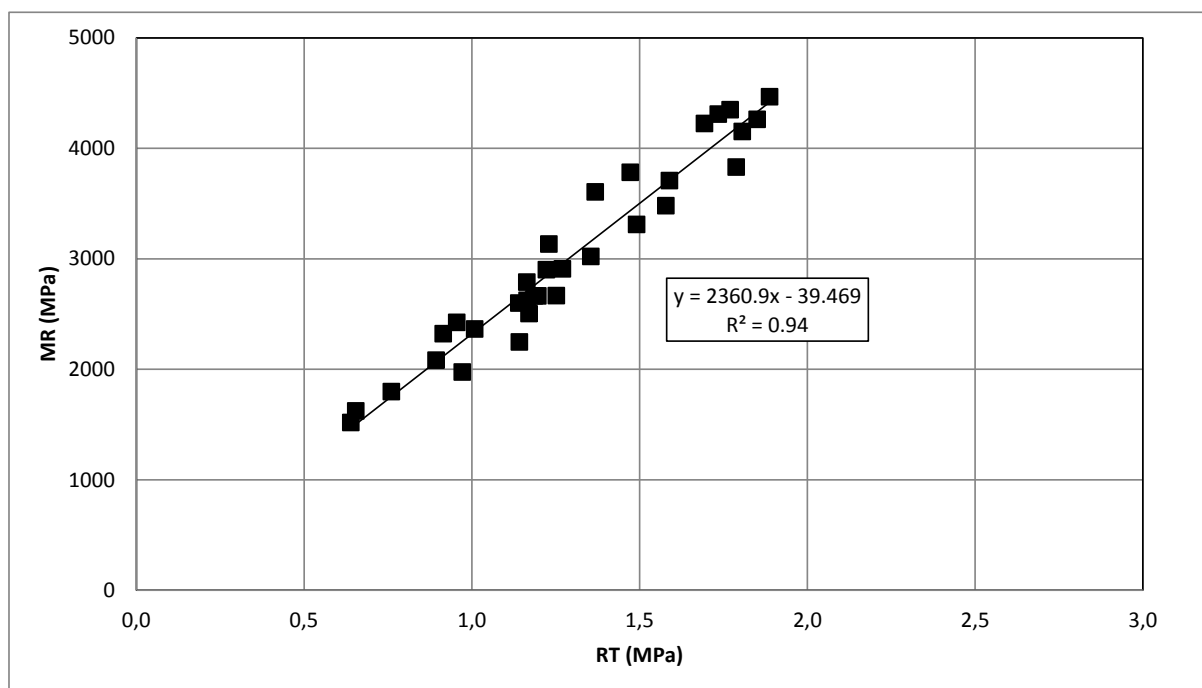
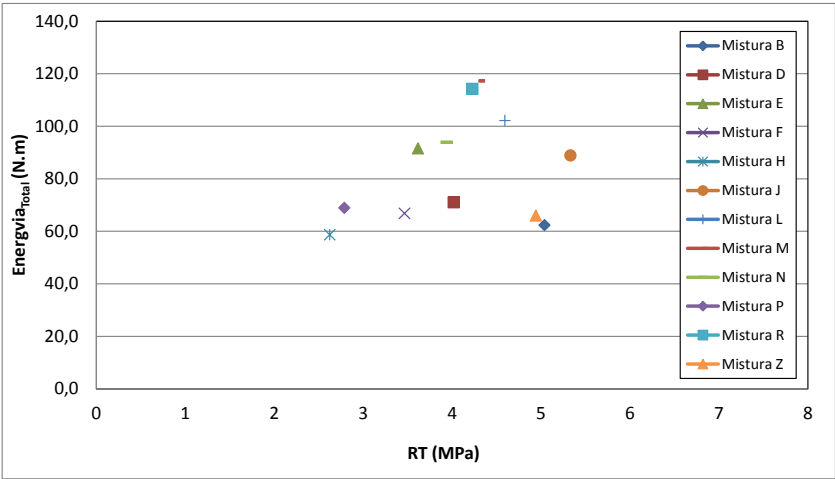


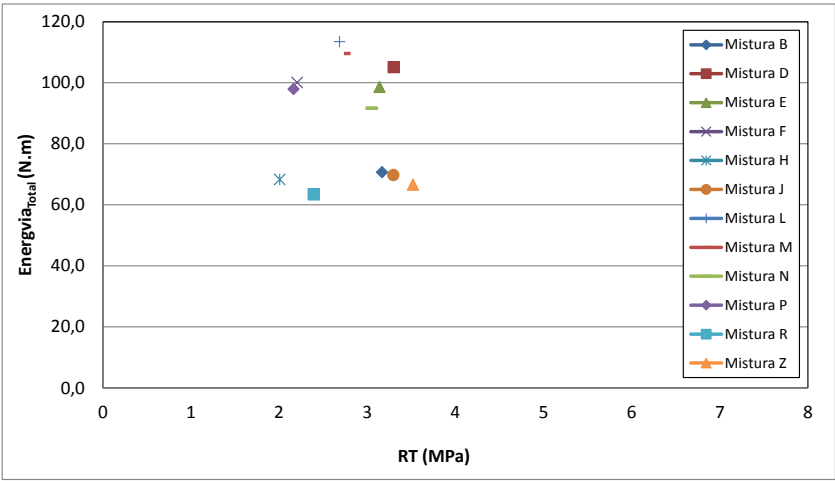
Figura 11. Relação entre módulo de resiliência e resistência à tração (32 misturas asfálticas – Parte 1)

Dos resultados apresentados, observou-se uma grande influência da temperatura tanto no parâmetro resistência à tração, como na determinação da energia dissipada. Em temperaturas mais baixas (5°C), a ruptura da amostra deu-se de forma mais ‘frágil’, estando o corpo de prova mais próximo do regime elástico. A temperaturas mais altas (35°C), foi possível observar a deformação da amostra no plano de aplicação da carga, o que vem a descaracterizar o ensaio de ruptura por compressão diametral proposto inicialmente por Lobo Carneiro para amostras de concreto.

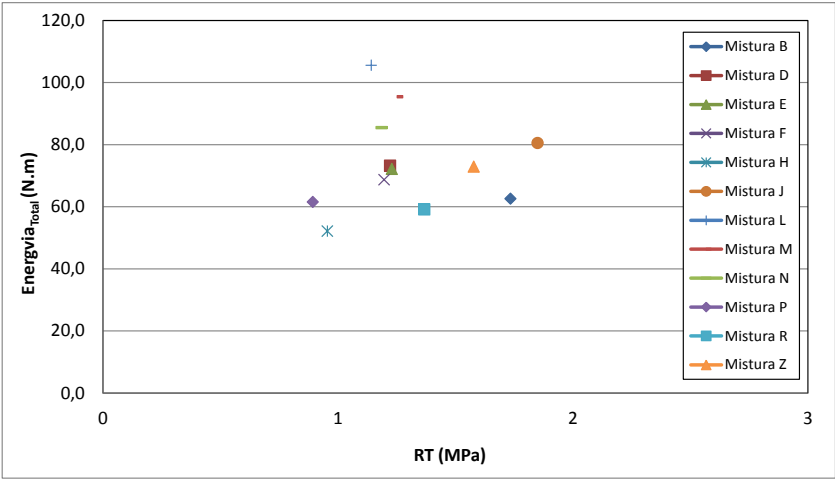
Outro dado bastante importante é que não foi observada correlação entre os valores de resistência à tração por compressão diametral e de energia dissipada total, conforme ilustrado na **Figura 12**, para nenhuma das temperaturas avaliadas.



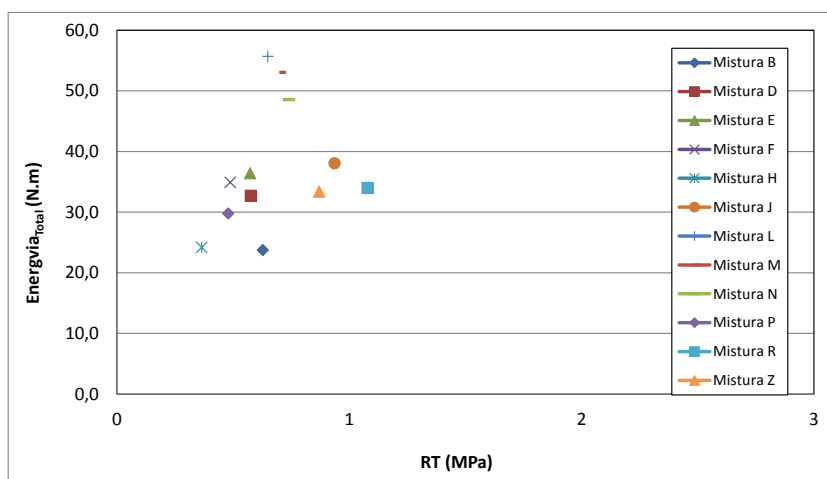
(a) 5°C



(b) 15°C



(c) 25°C



(d) 35°C

Figura 12. Comparativo dos valores de resistência à tração e energia dissipada total (a) 5°C, (b) 15°C, (c) 25°C e (d) 35°C.

6. CAMADA ASFÁLTICA INTERMEDIÁRIA ANTI-REFLEXÃO DE TRINCAS (SAMI)

6.1 Revisão Bibliográfica

A reabilitação de pavimentos asfálticos com elevado grau de trincamento é comumente realizada através da aplicação de uma nova camada asfáltica (convencionalmente densa e contínua). As trincas por reflexão, porém, são uma problemática que persiste, de forma que muitas vezes, em poucos meses, já é possível observá-las na superfície da nova camada asfáltica.

Algumas técnicas encontram-se disponíveis no mercado para evitar, ou mesmo retardar, o aparecimento de trincas por reflexão. Uma delas é o uso de camadas intermediárias, que funcionam como absorvedoras de tensão, comumente chamadas de SAMI (*Stress Absorbing Membrane Interlayer*), ou mesmo RCRI (*Reflective Crack Relief Interlayer*). O intuito dessa camada intermediária é fazer com que as tensões de tração e de cisalhamento, geradas pela ação do tráfego e potencializadas devido às trincas, sejam absorvidas parcialmente nessa camada, que é convencionalmente mais nobre.

6.1.1 Procedimentos de Dosagem do SAMI

O SAMI é geralmente composto por material granular fino e ligante modificado, podendo haver ainda a incorporação de aditivos (minerais e/ou químicos). Esse tipo de material

asfáltico já vem sendo comercializado por diferentes empresas e acredita-se que o maior diferencial entre os diversos produtos esteja na modificação do ligante. Esse, porém, costuma ser um segredo industrial, de forma que na literatura só se tem acesso à caracterização do produto final, sem muitas informações de como ele é produzido, e quais seus materiais constituintes.

A distribuição granulométrica de uma camada anti-reflexão de trincas também é uma variável importante, principalmente por não existirem especificações de faixas granulométricas que devam ser seguidas a fim de guiar o projeto da mistura. Sabe-se, da literatura, que o mais comum é o uso de agregados que tenham todas as partículas passando pela peneira de 9,5mm, porém essa diretriz não segue nenhuma especificação.

O passo inicial para a proposição e desenvolvimento de uma mistura asfáltica que funcione como uma camada anti-reflexão de trincas é a seleção de um procedimento de dosagem adequado. Muitos dos trabalhos que foram publicados sobre esse tipo de mistura não apresentam os detalhes de como a mistura final foi proposta, nem os parâmetros utilizados. Os parágrafos a seguir ilustram alguns trabalhos encontrados que, mesmo de forma muito simplificada, abordam alguns dados do projeto da camada anti-reflexão de trincas. Os mesmo se encontram em ordem cronológica.

BLANKENSHIP *et al.* (2004) apresentam alguns limites de parâmetros volumétricos, bem como do teste de fadiga, para seleção da mistura, conforme ilustrado na **Tabela 2**. Os autores mencionam que essa camada intermediária deve ser rica em ligante asfáltico altamente modificado, e agregado miúdo. O ligante utilizado foi um '*cross-linked elastomeric styrene-butadiene block copolymer system*', que, de acordo com os autores, fornece características elásticas ao ligante, além de torná-lo resistente a tensões de tração, cisalhamento e flexão.

Tabela 2. Critérios de dosagem apresentados por BLANKENSHIP *et al.* (2004)

Parâmetros Volumétricos	
N _{máx}	50 giros
Volume de Vazios (VV)	0,5 a 2,5%
Vazios no Agregado Mineral (VAM)	16% (min)
Estabilidade Hveem	18 (min)
Teor de Projeto	7,0% (min)
Ensaio de Fadiga (Vigota na Flexão)	
Volume de Vazios	3,0 ± 1,0%
Vida de Fadiga (@ 2.000 µε)	100.000 ciclos (mín)

MAKOWSKI *et al.* (2005) apresentam os mesmos critérios dos parâmetros volumétricos e de fadiga ilustrados na acima, porém adicionam exigências às características do ligante asfáltico e sugerem uma faixa granulométrica, conforme apresentado na **Tabela 3**.

Tabela 3. Critérios de dosagem apresentados por MAKOWSKI *et al.* (2005)

Especificações do Ligante Asfáltico	
Recuperação Elástica após RTFO (ASTM D6084 Sec 6.2)	45% (min) @ 25°C
Teste de Separação (ASTM D5976 Sec 6.1)	6°C de diferença (max) após 48h
Distribuição Granulométrica	
3/8" (9,5mm)	100%
Nº 4 (4,7mm)	80-100%
Nº 8 (2,36mm)	60-85%
Nº 16 (1,18mm)	40-70%
Nº 30 (0,6mm)	25-55%
Nº 50 (0,3mm)	15-35%
Nº 100 (0,15mm)	8-20%
Nº 200 (0,075mm)	6-14%

BENNERT e MAHER (2008) também não mencionaram os critérios de dosagem da mistura, porém apresentam características finais das misturas utilizadas no trabalho, conforme ilustrado na **Tabela 4**.

Tabela 4. Parâmetros finais da mistura apresentados por BENNERT e MAHER (2008)

Parâmetros Volumétricos	
Teor de Projeto	7,5%
Vazios no Agregado Mineral (VAM)	19,1%
Densidade Máxima (Gmm)	2,425
Densidade Agregados (Gsb)	2,726
Distribuição Granulométrica	
3/8" (9,5mm)	100%
Nº 4 (4,75mm)	93%
Nº 8 (2,36mm)	71%
Nº 16 (1,18mm)	51%
Nº 30 (0,6mm)	36%
Nº 50 (0,3mm)	21%
Nº 200 (0,075mm)	8,6%

BENNERT *et al.* (2009) também não adicionam novas exigências ao projeto da camada anti-reflexão de trinca. Os autores apenas mencionam que o teor de projeto encontrado foi de 8,3% e 100% das partículas de agregados passavam na peneira de 9,5mm. SHIMAZAKI *et al.* (2010), em um projeto desenvolvido no Japão, apresentam algumas características do ligante altamente modificado (8% de SBS), como por exemplo: penetração a 25°C de 177 décimos de milímetro, ponto de amolecimento de 84°C e viscosidade absoluta a 60°C de 11.300 Pa.s. DAVE *et al.* (2010) não apresentaram muitas informações sobre como a mistura foi desenvolvida, porém menciona o uso do Compactador Giratório Superpave (CGS). A mistura asfáltica final apresentou 9,0% de teor de projeto e volume de vazios variando de 0,5 a 2,5%.

6.1.2 Espessura da Camada de SAMI

Dentro da revisão bibliográfica realizada, verificou-se também a espessura que vem sendo recomendada para camadas intermediárias anti-reflexão de trincas, visto que seria executado um trecho experimental contemplando essa solução de restauração. Essa camada é geralmente considerada delgada, visto que não possui função estrutural, porém deve cumprir a função de absorver as tensões geradas por movimentos cisalhantes e de flexão das trincas existentes na camada inferior. A seguir são apresentados os resultados de alguns estudos encontrados (em ordem cronológica).

BLANKENSHIP *et al.* (2004) apresentam resultados de campo de diferentes projetos que utilizaram camada anti-reflexão de trincas. Esses projetos diferenciavam-se entre si pelo tipo e espessura de mistura asfáltica colocada sobre o SAMI, conforme ilustrado na **Tabela 5**. Em todos os projetos, adotou-se 25mm para a camada intermediária, e essa espessura foi considerada adequada. Uma observação importante desse trabalho foi que, em quatro dos cinco casos investigados, a trinca refletiu para a camada superior, porém o SAMI intermediário ficou intacto, conforme ilustrado na **Figura 13**.

Tabela 5. Trechos experimentais com utilização do SAMI (BLANKENSHIP et al., 2004)

Tráfego	Camada superior (mm)	SAMI (mm)
3 million ESALs	75 mm (<i>Dense Grade</i>)	25
1.8 million ESALs	100 mm (<i>Dense Grade</i>)	25
~ 4 million ESALs	90 mm (<i>Superpave</i>)	25
7 million ESALs	95 mm (<i>Superpave coarse</i>)	25
2 million ESALs	100 mm (<i>Superpave coarse</i>)	25

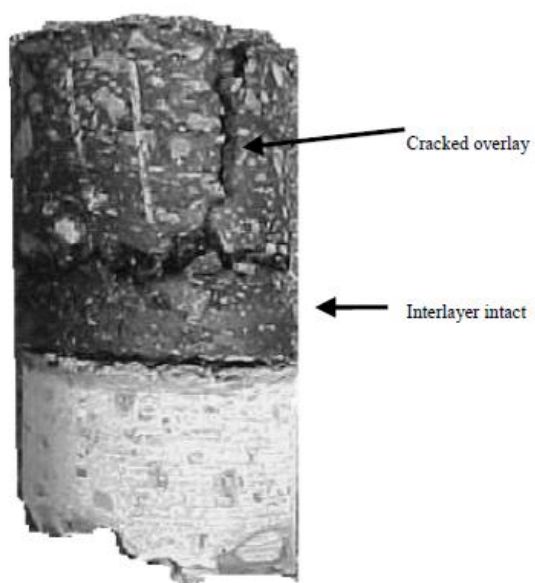


Figura 13. Corpo de prova retirado de campo ilustrando a propagação da trinca na camada superior, porém com a camada intermediária íntegra (BLANKENSHIP et al., 2004)

MAKOWSKI *et al.* (2005) avaliaram quatro projetos em que se adotou 25mm de espessura para a camada intermediária e variou-se a espessura da camada superior e o tipo de ligante asfáltico utilizado (**Figura 14**). Os autores mencionam que houve um retardo no aparecimento das trincas nos três últimos projetos, os mesmos que foram dosados através da utilização de especificações relacionadas ao desempenho a fadiga e estabilidade. O não-trincamento da camada intermediária, mesmo com o trincamento da camada superior (ilustrado na **Figura 13** acima), também foi observado em alguns corpos de prova extraídos de pista.

Location	Year Built	20-Year Design ESALs, Millions	Existing Pavement	Overlay Thickness Over Interlayer, in.	Surface Binder (Reliability)	Interlayer Flexural Beam Fatigue Cycles	Reflective Cracking Reduction (Interlayer vs. HMA-Only Controls) as of 2004	Comments
WI-23 Ripon	1996	2.0	Doweled JPCP	4.0	85/100 (about 60%) and PG 58-34 (98%)	6,775	0%	PG xx-34 sections had less cracking than similar 85/100 sections
I-94 Racine	2001	19.5	Doweled JRPC	4.0	PG 70-28 (98%)	100,000+	1% in eastbound 73% in westbound	Eastbound patches exhibited shrinkage
Lapham Blvd., Milwaukee	2002	1.0–3.0	Undoweled JPCP	2.0	PG 64-28 (98%)	100,000+	73%	
I-94 Eau Claire	2002	21.6	Doweled JRPC	3.5	PG 70-28 (91%)	100,000+	25% in Section 1 No control for Section 2 39% in Section 3	Initial cracks probably due to undoweled PCC patches and less reliable PG in a cool climate

Figura 14. Estruturas de pavimentos estudadas por MAKOWSKI et al. (2005)

BENNERT e MAHER (2008) realizaram estudos de laboratório e construíram trechos experimentais em uma rodovia de Nova Jersey. O pavimento original nessa rodovia era de concreto de cimento Portland (228,6mm) e já havia algumas camadas de recapeamento com mistura asfáltica (variando de 63,5 a 150mm). As trincas de reflexão já haviam surgido em alguns pontos na superfície de última camada asfáltica, de forma que se optou por fazer, no local dos trechos experimentais, a fresagem de 76,2mm da camada asfáltica com adoção de duas soluções pro recapeamento: (i) 25mm SAMI + 50mm CA 12,5mm + 38,1mm CA 9,5mm; e (ii) 76,2mm CA 12,5mm + 38,1mm CA 9,5mm. Os autores mencionam o bom comportamento da estrutura com o SAMI, porém alertam para o fato que seções com

camada de SAMI de espessura média de 18,9 mm apresentaram fissuras precoces, de forma que a tolerância dada pelos autores para esse tipo de camada foi de 22,2mm a 31,8m.

No estudo desenvolvido por BENNERT *et al.* (2009) os autores estudaram uma estrutura composta por 50,8mm de camada de regularização (CA com 30% de material fresado e CAP modificado por SBR latex classificado como PG 52-33) + 25,4mm de SAMI + 50,8mm da mesma mistura usada como camada de regularização + 38,1mm de um Gap Graded 9,5mm preparado com asfalto borracha. Essas camadas foram executadas acima de um pavimento de concreto já deteriorado. Foi construída também uma estrutura sem SAMI a fim de facilitar os comparativos; os resultados após 8 meses indicaram que na seção sem SAMI houve uma média de 77.6% de fissuração nas juntas transversais, enquanto na seção com SAMI, essa média foi de 8.2% de fissuração nas juntas transversais. A **Figura 15** ilustra um corpo de prova extraído de pista, onde mais uma vez foi observado o SAMI praticamente intacto, mesmo em locais onde a trinca já havia aparecido na superfície.



Figura 15. Corpo de prova da estrutura do pavimento estudado por BENNERT *et al.* (2009) e ilustração da camada intermediária anti-reflexão de trincas ainda íntegra.

SHIMAZATI *et al.* (2010) apresentaram resultados de duas estruturas de camadas colocadas sobre um pavimento de concreto existente, em uma rodovia federal na cidade de Niigata, Japão. O primeiro trecho (à esquerda na **Figura 16**) era composto por duas camadas de SMA: a primeira camada (inferior) composta por ligante modificado (nomeado como MD) e a segunda camada (superfície) por ligante asfáltico de alto desempenho (nomeado como HP). O segundo trecho (à direita na **Figura 16**) adotou como primeira camada o SAMI e como

camada superficial um concreto asfáltico com ligante asfáltico modificado (MD). Nesse estudo, a estrutura com as duas camadas de SMA apresentou melhor desempenho quando comparado a estrutura com o SAMI.

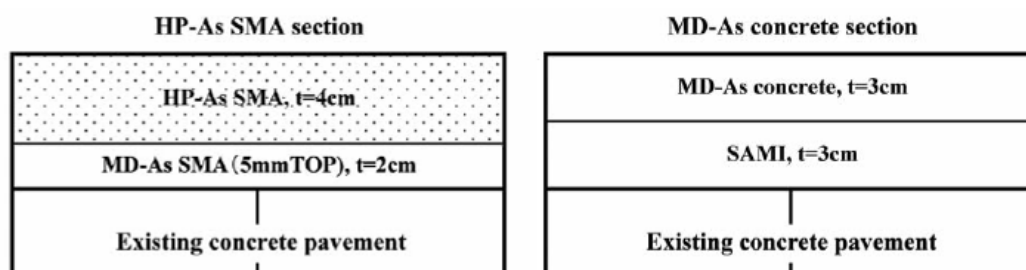


Figura 16. Estruturas de pavimentos estudadas por SHIMAZATI et al. (2010)

6.2 Dosagem do SAMI

A distribuição granulométrica do pó de pedra da pedreira escolhida apresentou enquadramento adequado nos requisitos apresentados em diversos trabalhos da literatura. Dessa forma, optou-se por adotar como granulometria alvo do SAMI, a mesma do pó de pedra, visando facilitar questões operacionais na etapa de fabricação da mistura em usina. A **Figura 17** apresenta a granulometria que será mantida nas vários projetos de mistura do SAMI.

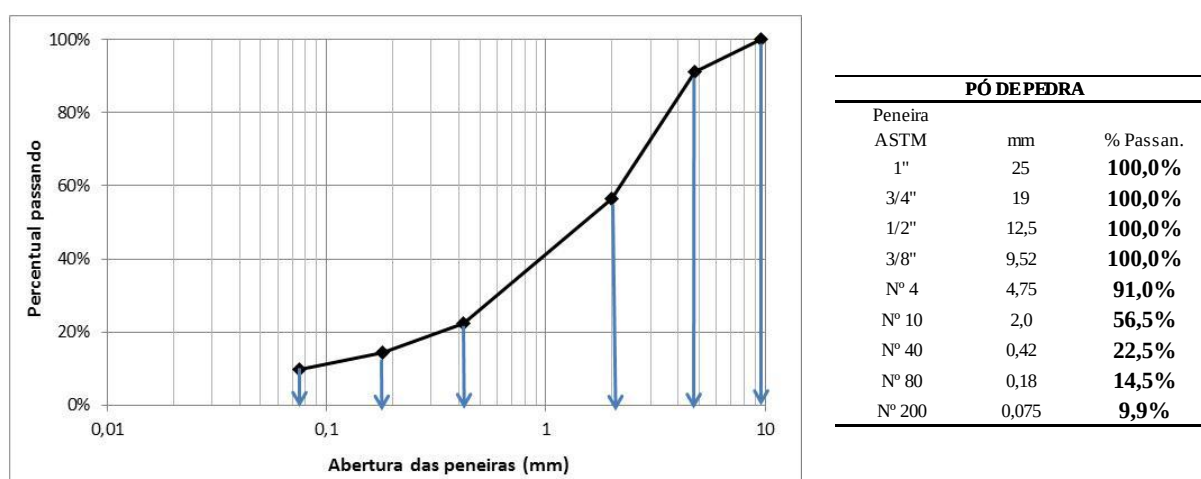


Figura 17. Distribuição granulométrica adotada para o SAMI

Para cada uma das dosagens foram determinados os seguintes dados:

- Parâmetros Volumétricos: os parâmetros volumétricos são geralmente o ponto inicial da dosagem da maior parte das misturas asfálticas. No caso do projeto de uma mistura asfáltica a ser aplicada como camada intermediária anti-reflexão de trincas, o principal dentre os parâmetros volumétricos é o volume de vazios (V_v), onde recomenda-se que este não ultrapasse 2,0%. Essa diretriz será seguida para todas as dosagem realizadas para esse projeto de pesquisa.
- Parâmetros de Densificação (Compactador Giratório): os parâmetros CDI, TDI_m e TDI, são parâmetros obtidos durante a compactação dos corpos de prova no compactador giratório Superpave. Estes vêm sendo utilizados por alguns autores (BAHIA *et al.*, 1998; MAHMOUD e BAHIA, 2004; NASCIMENTO, 2008) para obtenção de informações sobre a trabalhabilidade (CDI) e a resistência da mistura a deformação permanente (TDI_m e TDI). A **Figura 18** ilustra os três parâmetros calculados através da curva de densificação de um corpo de prova.

O CDI é definido como a área abaixo da curva de densificação (**Figura 18**) obtida com o SGC a partir do giro de número 8 (N_8) até o ponto equivalente a 92% da densidade máxima medida da mistura (do inglês *theoretical maximum specific gravity of the mixture* – Gmm). Este índice é visto como proporcional ao trabalho aplicado durante a compactação pelos rolos compactadores, para que as misturas atinjam a densidade requerida durante a construção. Misturas com elevado valor de CDI requerem uma grande quantidade de energia para densificar durante a compactação (construção). Portanto, valores mais baixos de CDI são desejáveis porque menor quantidade de passadas do rolo compactador seria necessária.

O TDI é a área sob a curva de densificação entre 92 e 98% do valor da Gmm, conforme ilustrado na **Figura 18**. Este índice baseia-se no princípio de que o pavimento continua sua densificação, mesmo após sua abertura ao tráfego (a princípio com 92% da Gmm), devido às cargas impostas pelos veículos. Misturas com

elevado TDI são mais desejáveis, pois se espera que esta requeira uma grande quantidade de energia (alto volume de tráfego) para densificar. O pavimento ideal seria aquele fácil para densificar durante a construção (CDI baixo) e difícil de densificar sob o tráfego (elevado TDI) (MAHMOUD e BAHIA, 2004; NASCIMENTO, 2008).

O TDI modificado (TDI_m), adotado por NASCIMENTO (2008), é calculado de 92% de Gmm até o giro do $N_{projeto}$. O autor utiliza este parâmetro quando os CPs não são compactados até 98% da Gmm, possibilitando o aproveitamento dos corpos de prova moldados até o $N_{projeto}$.

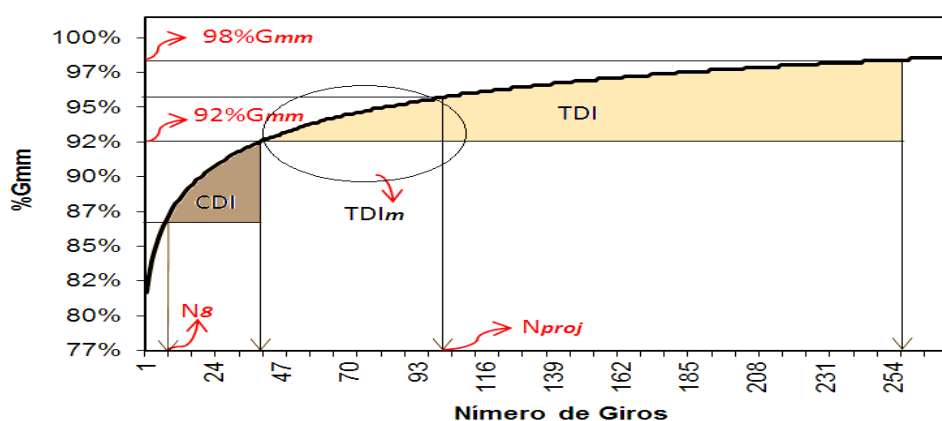


Figura 18. CDI, TDI e TDI_m determinados a partir da curva de compactação Superpave (LOPES *et al.*, 2011)

- Módulo de Resiliência: optou-se por realizar o ensaio de módulo de resiliência em todos os corpos de prova da dosagem a fim de se verificar possíveis variações de rigidez com a variação do percentual de ligante adicionado. Não foi encontrado um valor limite para o valor de MR aplicado ao SAMI. Sabe-se, porém, que a rigidez não pode ser elevada como a de um concreto asfáltico, visto que a principal função do SAMI é ser flexível para absorver as tensões (de tração e cisalhantes) geradas por trincas presentes na camada subjacente (seja uma base cimentada, ou o revestimento envelhecido existente).
- Resistência à Tração por Compressão Diametral (Modificado): o ensaio de resistência à tração por compressão diametral também foi realizado em todos os corpos de prova ainda na fase de dosagem. Neste ensaio, que é realizado com carregamento

monotônico, modificou-se a velocidade de deslocamento da prensa de 50mm/min para 1mm/min, na tentativa de quantificar melhor o efeito do ligante asfáltico no cálculo da energia dissipada.

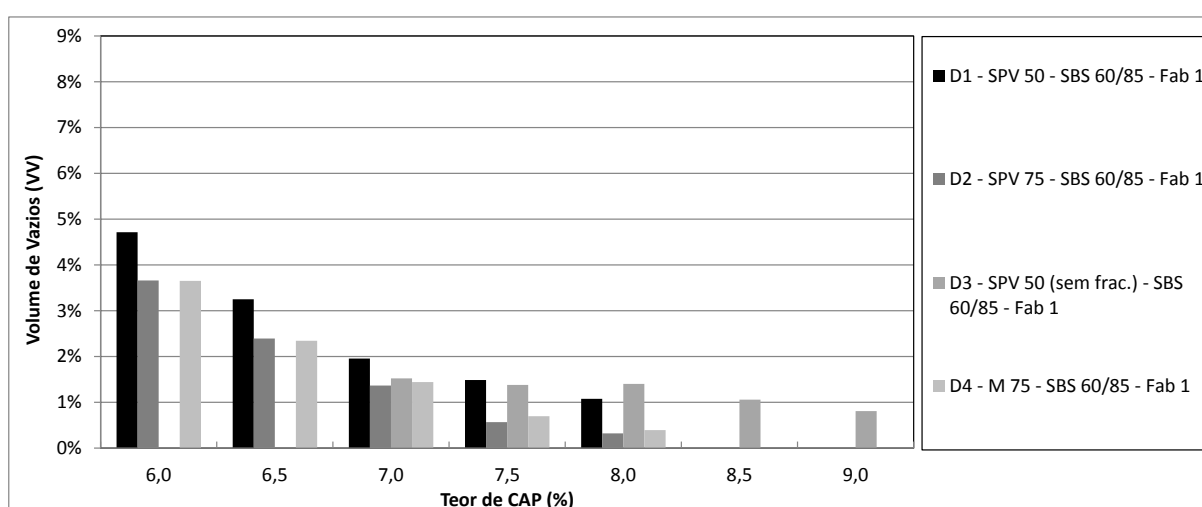
Foi inicialmente utilizado um ligante asfáltico modificado e o agregado da pedreira Jorcal. Optou-se por fracionar os agregados peneira a peneira (totalizando seis frações, conforme ilustrado na **Figura 19**), a fim de garantir a granulometria-alvo na produção dos corpos de prova da dosagem.



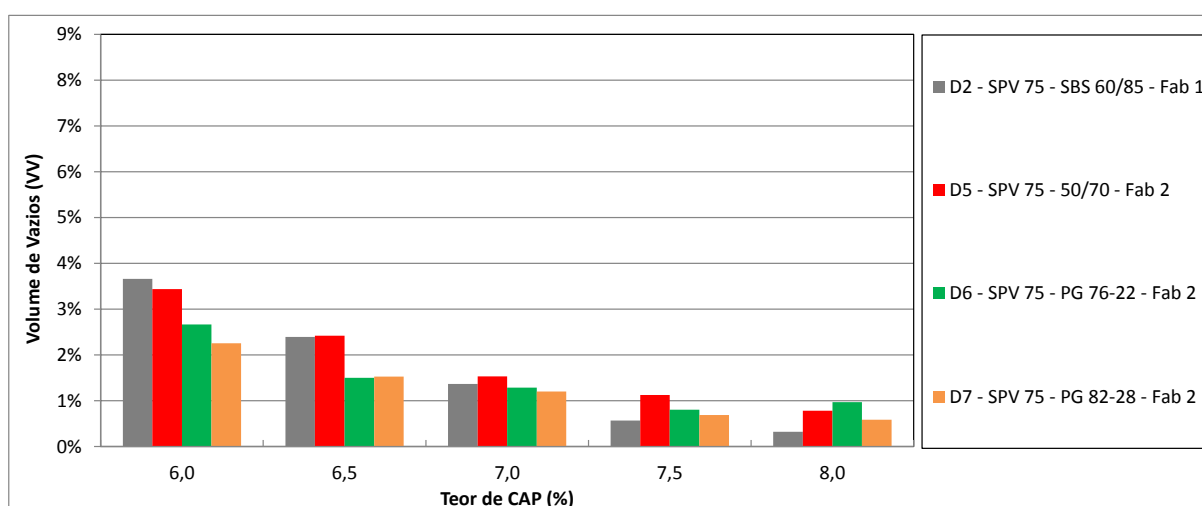
Figura 19. Ilustração do fracionamento dos agregados peneira a peneira para composição da granulometria do SAMI feita no CDT

Dentre as variáveis investigadas em laboratórios, encontram-se: (i) método de compactação (Marshall e Superpave); (ii) número de giros/golpes; e (iii) tipo de ligante asfáltico. Na **Dosagem 1** realizou-se a dosagem adotando 50 giros no compactador giratório Superpave e na **Dosagem 2**, 75 giros. Na **Dosagem 3** verificou-se o efeito do não fracionamento dos agregados peneira a peneira (simulando o que acontece na usina). Na **Dosagem 4** realizou-se a dosagem seguindo a compactação Marshall, que ainda é o método mais comum no Brasil. Até a quarta dosagem o ligante adotado foi o CAP modificado por SBS fornecido pelo Fabricante 1. Para as **Dosagens 5 a 7**, variou-se o tipo ligante (todos fornecidos pelo Fabricante 2), sendo o ligante 'A', um CAP convencional classificado como 50/70 (**Dosagem 5**), o ligante 'B', um CAP modificado por SBS, classificado como 60/85 (**Dosagem 6**), e o ligante 'C', um CAP altamente modificado por SBS, HiMA (**Dosagem 7**). Vale salientar que os

ligantes utilizados nas dosagens 6 e 7, foram modificados a partir do CAP 50/70 da Dosagem 5. Na última dosagem (SAMI Trecho Experimental) utilizou-se outro ligante altamente modificado, Fabricante 1. A mistura projetada na ultima dosagem foi a selecionada para execução do trecho experimental, e suas características são abordadas em mais detalhes no item 8 deste relatório. As **Figuras 20 a 24**, a seguir, apresentam um comparativo de alguns parâmetros obtidos para as diferentes dosagens. Optou-se por dividir esse comparativo em dois grupos, sendo (a) com relação à forma de compactação/preparação dos corpos de prova e (b) com relação ao tipo de ligante asfáltico empregado.

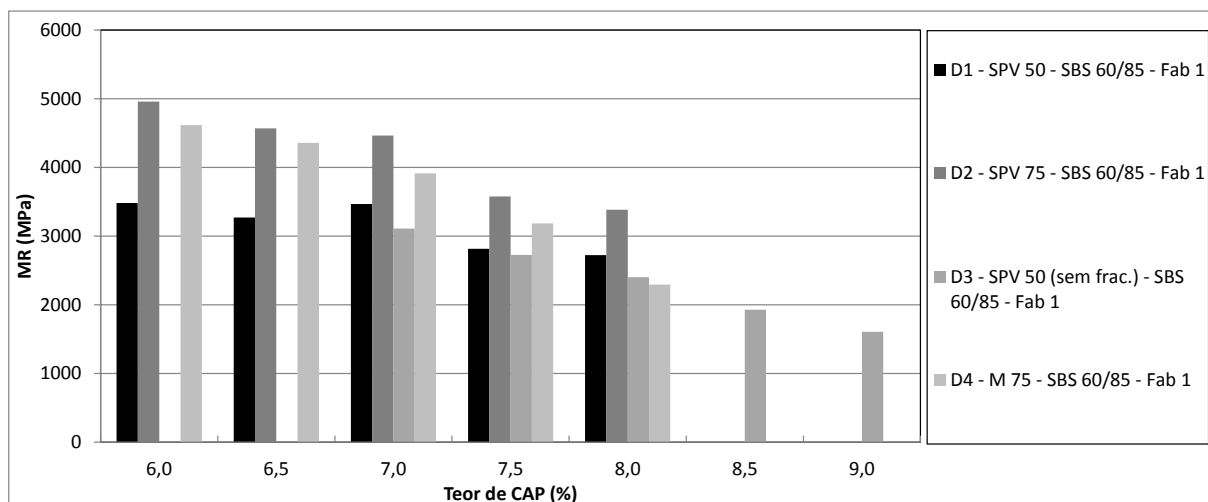


(a)

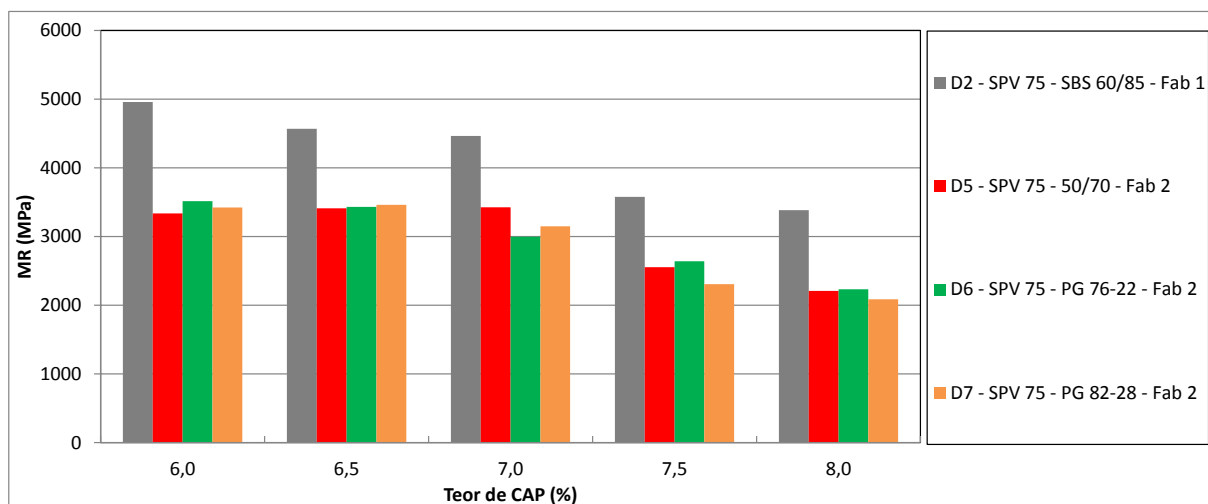


(b)

Figura 20. Volume de vazios (a) comparativos dos métodos de compactação e (b) comparativo entre diferentes ligantes asfálticos

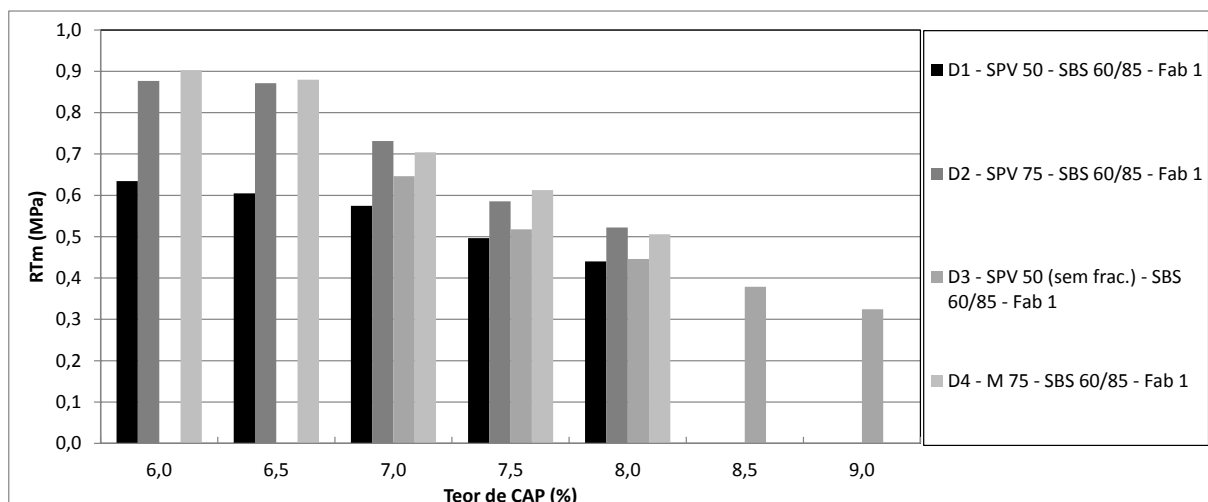


(a)

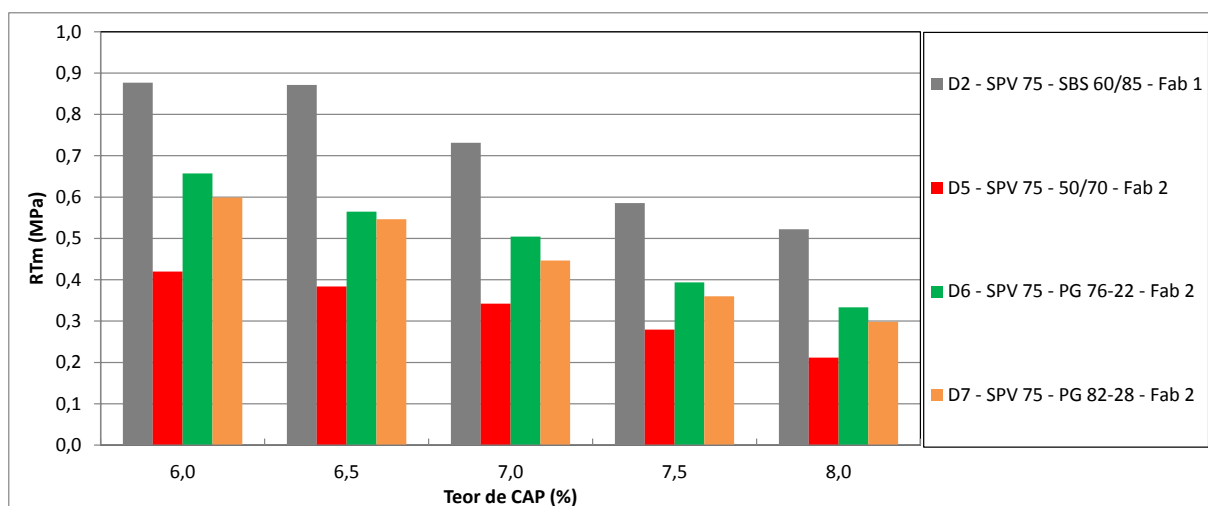


(b)

Figura 21. Módulo de resiliência (a) comparativos dos métodos de compactação e (b) comparativo entre diferentes ligantes asfálticos

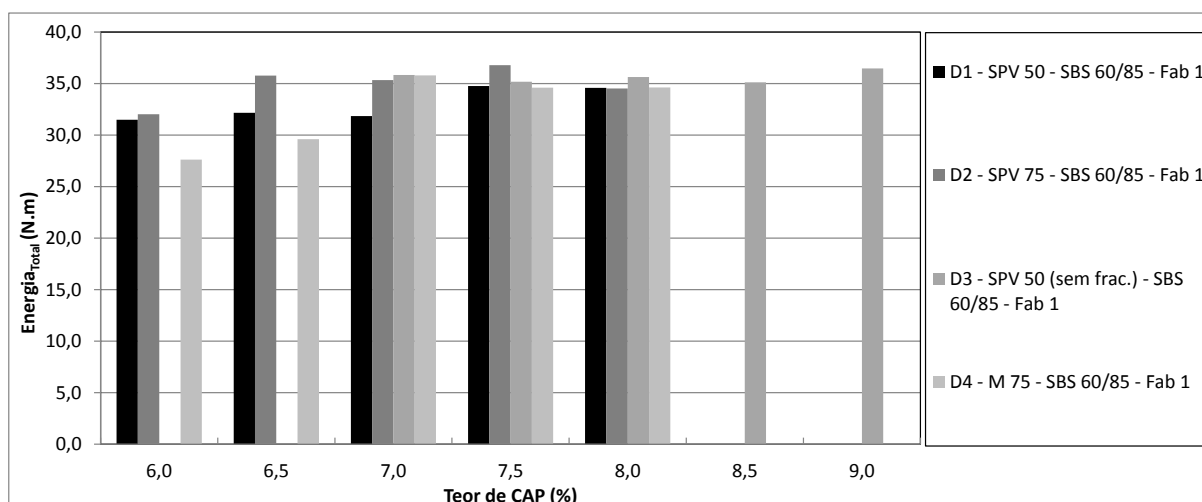


(a)

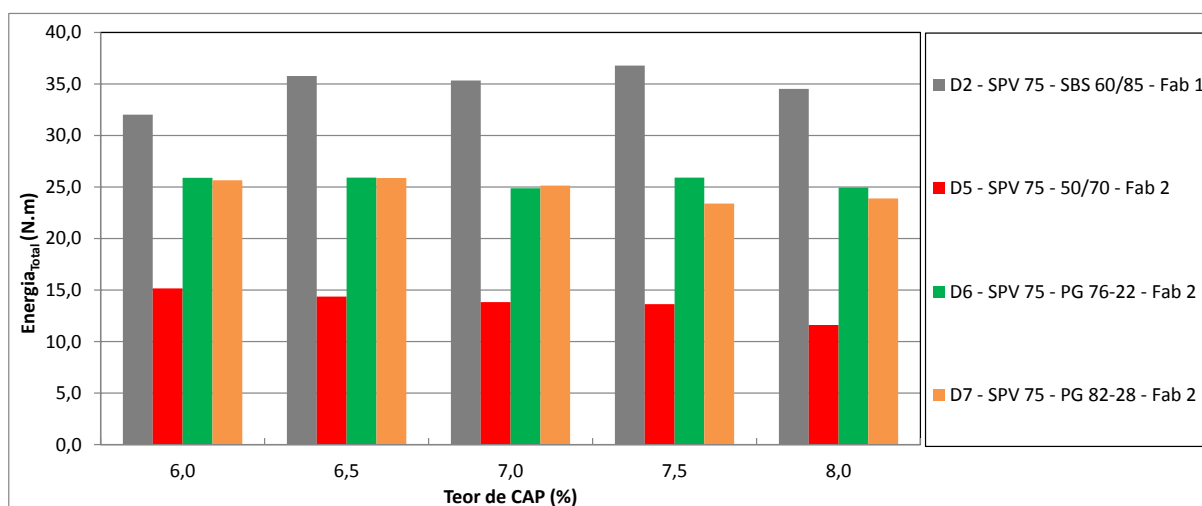


(b)

Figura 22. Resistência à tração por compressão diametral (velocidade de carregamento = 1mm/min) (a) comparativos dos métodos de compactação e (b) comparativo entre diferentes ligantes asfálticos

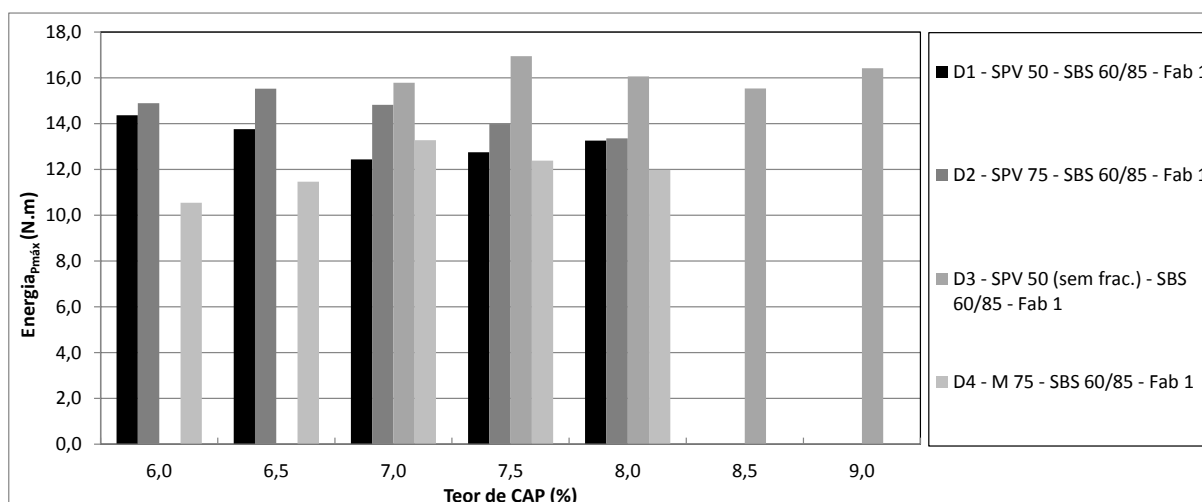


(a)

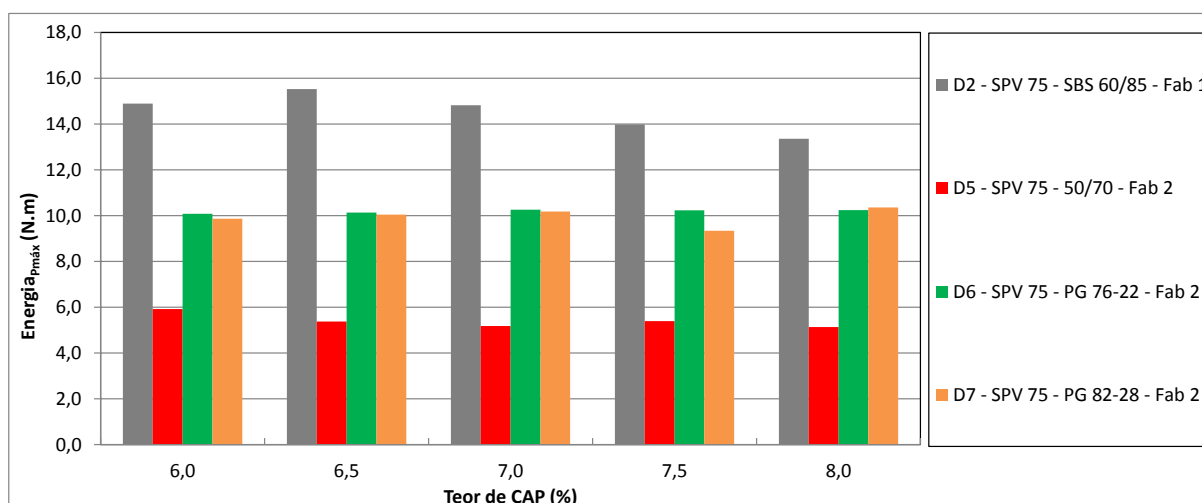


(b)

Figura 23. Energia total - determinada a partir dos dados obtidos do ensaio de RT_m (a) comparativos dos métodos de compactação e (b) comparativo entre diferentes ligantes asfálticos



(a)



(b)

Figura 24. Energia até a carga máxima - determinada a partir dos dados obtidos do ensaio de RT_m (a) comparativos dos métodos de compactação e (b) comparativo entre diferentes ligantes asfálticos

A partir das diversas variações propostas para análise em cada dosagem testada, os resultados indicaram os seguintes parâmetros para dosagem em laboratório:

- Distribuição granulométrica: sem fracionamento, com 100% do material passante na peneira de abertura 4,75 mm.
- Número de giros no compactador giratório: 50
- Ligante altamente modificado por polímero (*High Modified Asphalt* - HiMA)

A **Tabela 6** apresenta um resumo das diversas dosagens realizadas para o SAMI.

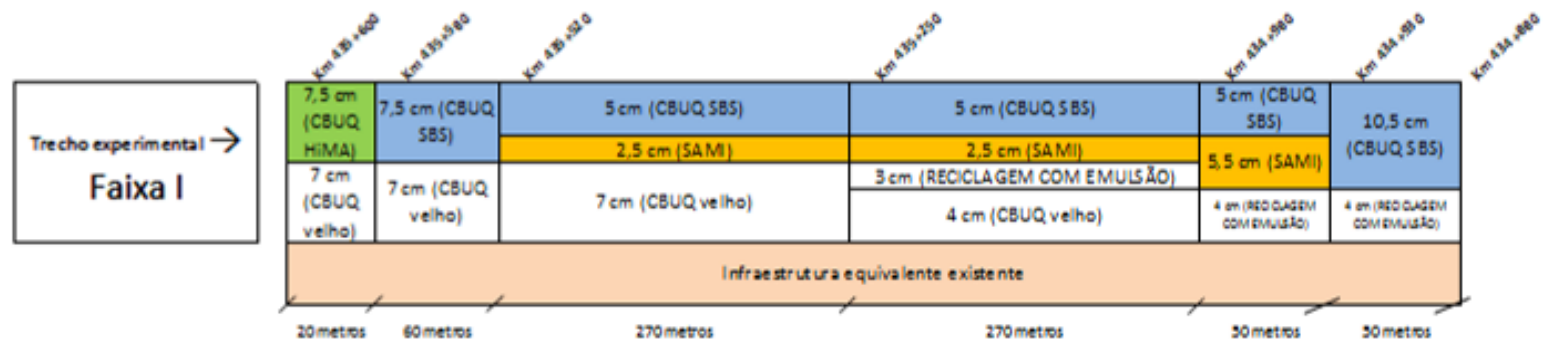
Tabela 6. Descrição das dosagens do SAMI

Dosagem 1 – Superpave – 50 giros – ligante Modificado SBS 60/85 – FABRICANTE 1.
Dosagem 2 – Superpave – 75 giros – ligante Modificado SBS 60/85 – FABRICANTE 1.
Dosagem 3 – Superpave - 50 giros – ligante Modificado SBS 60/85 sem fracionamento peneira a peneira - FABRICANTE 1.
Dosagem 4 – Marshall – 75 golpes – ligante Modificado SBS 60/85 - FABRICANTE 1.
Dosagem 5 – Superpave – 75 giros – ligante “A” – CAP 50/70 – FABRICANTE 2.
Dosagem 6 – Superpave – 75 giros – ligante “B” – PG 76-22 – FABRICANTE 2.
Dosagem 7 – Superpave – 75 giros – ligante “C” – PG 82-28 – FABRICANTE 2.
Dosagem Trecho Experimental – Superpave – 50 giros – HiMA – FABRICANTE 1.

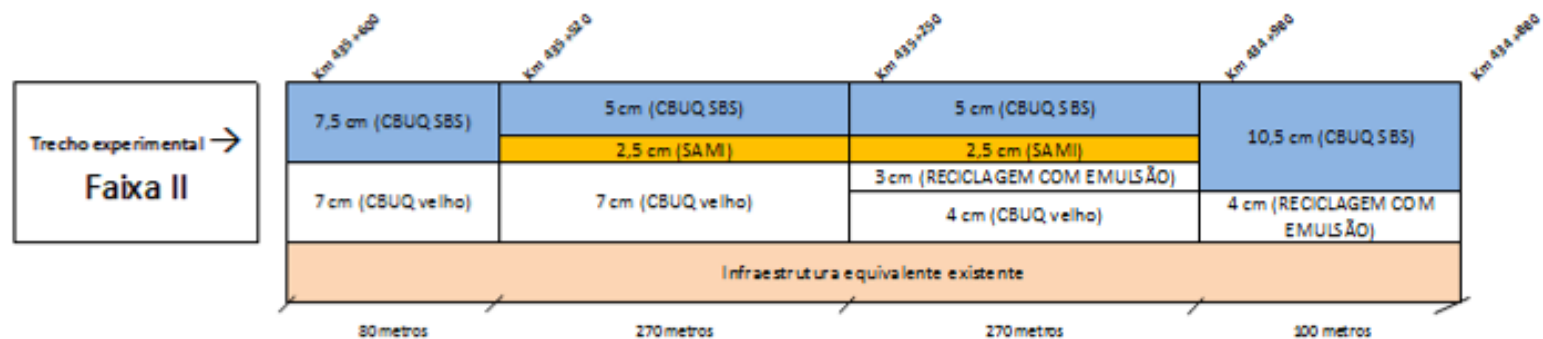
7. TRECHO EXPERIMENTAL

7.1 ‘As Built’ da Obra

A rodovia Régis Bittencourt liga as cidades de São Paulo e Curitiba tendo um papel importante na rede rodoviária brasileira, pois faz parte do principal corredor rodoviário de interligação dos mais importantes pólos econômicos das regiões Sudeste e Sul do Brasil e destas com os principais países do MERCOSUL. O tráfego atual é composto por um expressivo volume de ônibus e caminhões, que representam cerca de 70% do movimento total da rodovia. Dentro do escopo deste projeto, foram executados trechos experimentais, adotando como solução de restauração camadas asfálticas anti-reflexão de trincas no período de 13 a 17 de março de 2012, conforme ilustrado na **Figura 25**. O projeto das misturas asfálticas foi realizado pelo Centro de Desenvolvimento Tecnológico (CDT): (i) SAMI – 7,0%; (ii) CBUQ SBS – 4,2%, e (iii) CBUQ HiMA – 4,2% (esta última mistura seguiu a mesma dosagem do CBUQ SBS).



(a)



(b)

Figura 25. 'As Built' dos trechos experimentais – sentido Norte, (a) Faixa I e (b) Faixa II

A estrutura proposta procurou avaliar variáveis de interesse, conforme elencado a seguir:

- Verificar a eficiência do SAMI acima de um revestimento asfáltico trincado;
- Verificar o comportamento do CBUQ acima de um PMF (já reciclado) e de característica aberta, com o CBUQ acima de um revestimento asfáltico envelhecido;
- Verificar se o SAMI funciona acima de uma camada asfáltica aberta. Não localizou-se na literatura esse tipo de aplicação por SAMI, mas sendo o PMF muito utilizado pela concessionária, optou-se por testar essa solução em campo;
- Verificar se, com a utilização do SAMI, é possível reduzir a espessura da camada asfáltica nova.

7.2 Execução do Trecho Experimental

O local escolhido para execução dos trechos experimentais encontrava-se com elevado grau de deterioração (remendos, trincamentos, etc), conforme ilustrado na **Figura 26**.



Figura 26. Condição do trecho experimental antes do início da obra

O maior diferencial desse trecho experimental foi a utilização de ligante asfáltico altamente modificado (HiMA) para a produção de uma camada intermediária anti-reflexão de trincas, bem como para a produção de um concreto asfáltico. Para produzir 11 toneladas de HiMA, foram utilizados 1.760kg de polímero, onde o ligante base era um CAP de classificação por penetração 50/70. O processo de incorporação foi realizado por 4h em alto cisalhamento a uma temperatura de 190°C. A **Figura 27** apresenta algumas etapas da produção do HiMA.



Figura 27. Ilustração da produção do HiMA

O tanque com o HiMA foi conectado diretamente à usina, a fim de se evitar contaminações nos tanques de estocagem horizontais. As temperaturas das massas foram checadas e no momento da chegada ao trecho experimental, estas só haviam perdido em torno de 5°C. A **Figura 28** ilustra algumas etapas da produção da massa asfáltica na usina da empresa Jorcal (na cidade de Pariquera-açu, situada a aproximadamente 50km do trecho experimental).



(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 28. Produção da massa asfáltica: (a) conexão do tanque de ligante diretamente na usina; (b) carregamento do caminhão; (c) coleta de material para envio aos laboratórios da LTP/USP e CDT; e (d) usina gravimétrica utilizada na produção da massa asfáltica

A fresagem do trecho experimental variou de 7,5cm (km 435 +600 a 434 +980) a 10,5cm (km 434 + 980 a 434 + 880) em ambas as faixas de rolamento, conforme ilustrado na **Figura 29**. Após a fresagem, procedeu-se à limpeza da faixa (**Figura 30a**) e, em seguida, efetuou-se a pintura de ligação com emulsão asfáltica não modificada a uma taxa de $0,5L/m^2$ (**Figura 30b**).



Figura 29. Processo de fresagem



(a)



(b)

Figura 30. (a) Limpeza da faixa fresada e (b) Aplicação da pintura de ligação

A compactação do SAMI em campo foi realizada da mesma forma que o concreto asfáltico. Iniciou-se o processo com a passagem do rolo de pneu, e na sequência com o rolo chapa liso (sem vibração). A **Figura 31** apresenta a sequência de lançamento e compactação da massa, e a **Figura 32** ilustra o aspecto final da camada acabada, caracterizando uma mistura fina e de textura lisa. A **Figura 33** apresenta em sequência o espalhamento da mistura SPV 19 mm, em comparação direta com a mistura SAMI executada anteriormente, e o trecho experimental após o término da obra.



Figura 31. Lançamento e compactação do SAMI



Figura 32. Textura final do SAMI



Figura 33. Execução da camada de revestimento e vista do Trecho experimental após a conclusão da obra

7.3 Controle tecnológico

O controle da temperatura de cada caminhão foi realizado a fim de permitir o rastreamento no caso de eventuais problemas futuros com a massa. A temperatura mais elevada após a descarga mostra a evidência da capa que se forma sobre a massa com temperatura menor do que a temperatura interna, no meio do monte, isso acontece mesmo no caso de dupla lonagem dos caminhões, como foi o caso.

Cabe ressaltar que a formação desta crosta não afeta significativamente a qualidade da mistura distribuída, uma vez que a descarga na acabadora e a distribuição por rosca sem fim, promove uma remisturação da massa asfáltica. Apesar de alguns caminhões com temperatura acima da temperatura adequada (177°C), a massa distribuída não apresentou visualmente, indícios de mistura queimada. O monitoramento das condições de superfície e estrutural deve confirmar estas informações.

O controle tecnológico também contemplou a extração (**Figura 34**) de corpos de prova do trecho experimental para determinação de volume de vazios, teor de ligante e granulometria das misturas asfálticas aplicadas.



Figura 34. Extração de corpos de prova após o término da obra

Apesar de serem observados desvios em relação ao projeto, no que se refere à distribuição granulométrica para as misturas de SPV 19 mm e SAMI, estes não são considerados significativos, com potencial para alterar o desempenho do pavimento. O teor de ligante

atendeu às especificações de projeto. O volume de vazios entretanto mostrou variações importantes, que podem afetar negativamente o desempenho do pavimento. O monitoramento periódico deve apontar a validade dessas constatações.

Para avaliação das espessuras das misturas asfálticas aplicadas em campo, extraiu-se um total de 37 corpos de prova, sendo 22 da Faixa I e 15 da Faixa II. O maior numero de CPs da Faixa I deve-se ao fato de esta ter um total de 6 segmentos, enquanto a Faixa II possui apenas 4, conforme ilustrado nas **Figuras 35 e 36**.

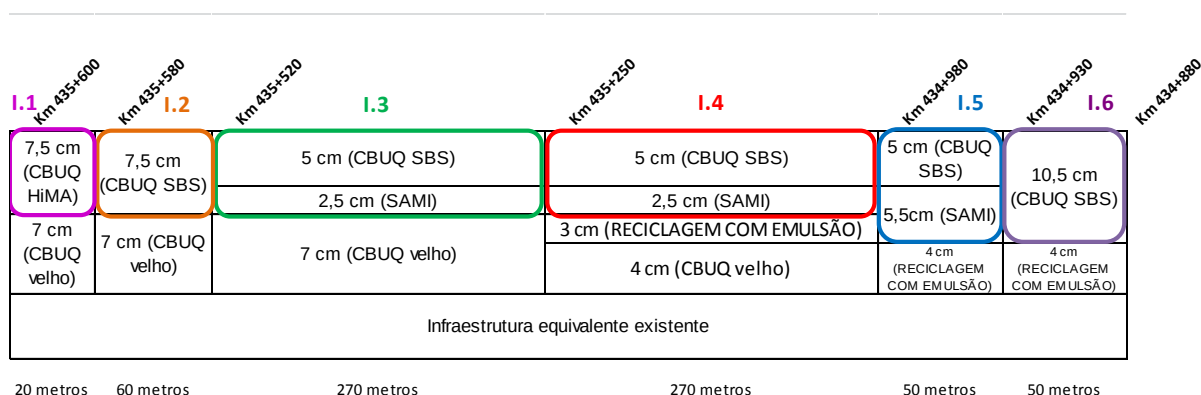


Figura 35. Ilustração da divisão dos grupos para determinação dos parâmetros volumétricos e ensaios mecânicos de MR e RT – Faixa I

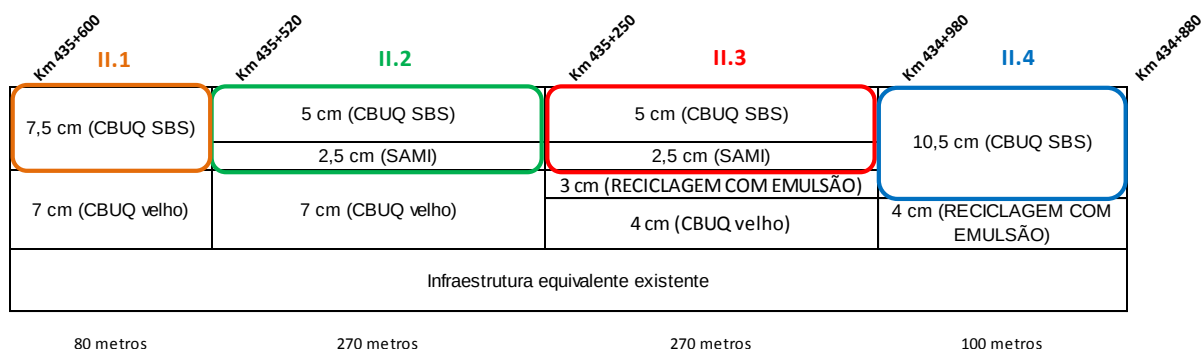


Figura 36. Ilustração da divisão dos grupos para determinação dos parâmetros volumétricos e ensaios mecânicos de MR e RT – Faixa II

Com os CPs extraídos de campo, procedeu-se a verificação das espessuras das camadas compactadas, conforme ilustrado na **Tabela 7**, que apresenta as médias e desvios padrão dos resultados obtidos para cada uma das camadas nas duas faixas.

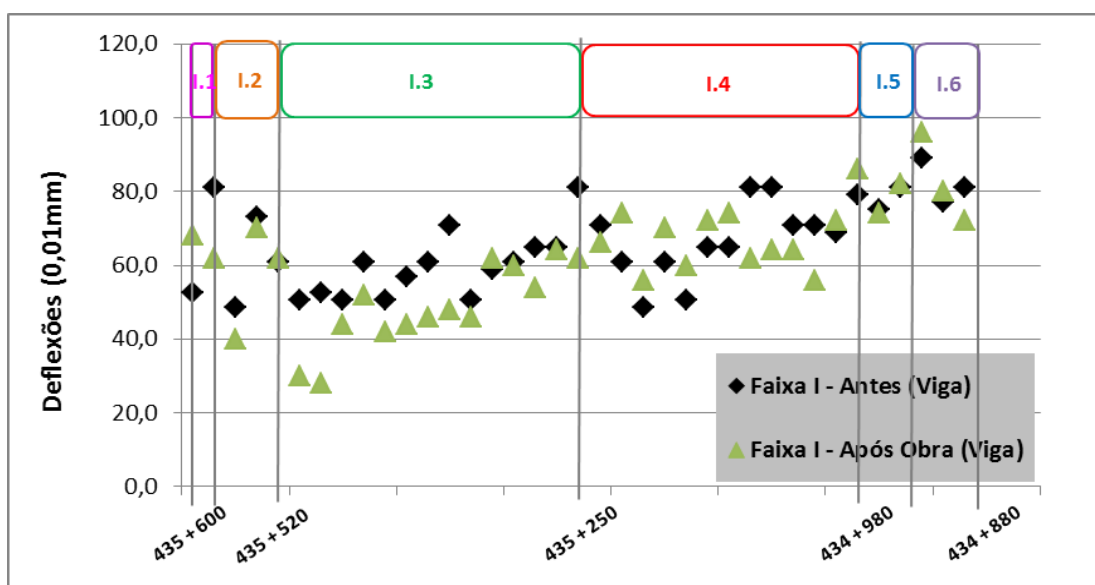
Observam-se algumas divergências entre o tamanho de alguns corpos de prova com a espessura da camada, conforme apresentado no ‘as built’ da obra. Porém, vale salientar que esse fato pode ser atribuído a alguns fatores, como: (i) a extração algumas vezes deixa parte do CP no fundo do furo, por quebrar antes de soltar a espessura total; (ii) pode ainda haver uma variação em relação a posição de onde o CP foi extraído; após a fresagem a superfície pode apresentar irregularidades, alterando sutilmente as espessuras material asfáltico aplicado.

Tabela 7. Média e desvio padrão das espessuras das camadas asfálticas executadas

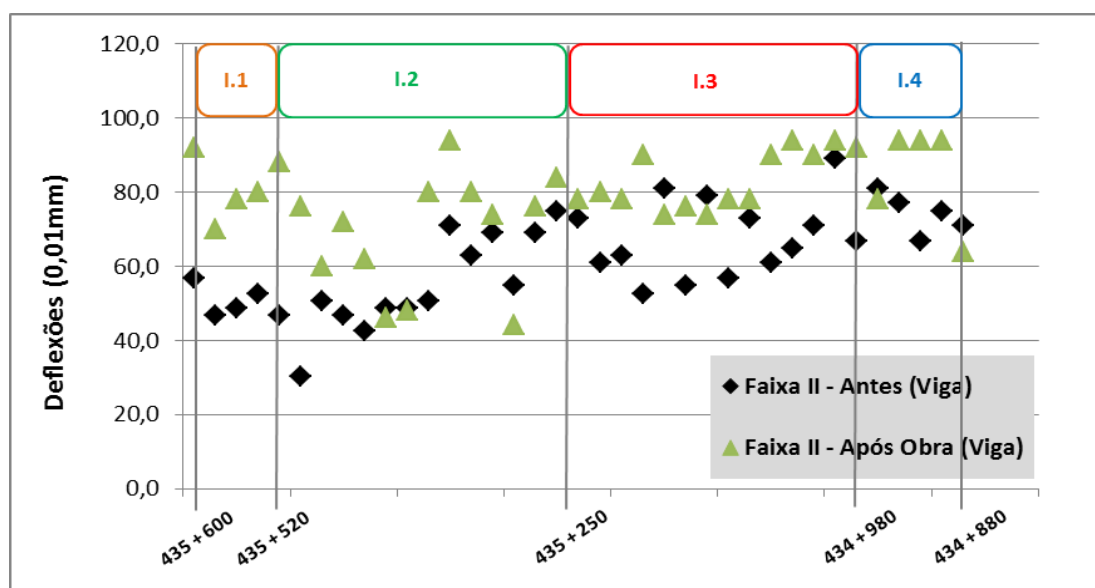
Camadas / Espessuras	Faixa I		Camadas / Espessuras	Faixa II	
	Média	DP		Média	DP
SAMI 2,5cm	2.1	0.76	SAMI 2,5cm	2.0	0.43
CBUQ 5cm	4.5	0.51	CBUQ 5cm	5.8	0.94
CBUQ 7,5cm	6.9	1.03	CBUQ 7,5cm	6.7	0.54
CBUQ 10,5cm	9.7	0.88	CBUQ 10,5cm	9.8	3.01

7.4 Controle Deflectométrico

Antes do início da obra, foi realizado o controle deflectométrico através da viga Benkelman. A faixa I apresentou deflexão média no ponto de aplicação de carga de 66,8 (0,01 mm) e desvio padrão de 11,4 (0,01 mm) e a faixa II teve média de 63,4 (0,01 mm) e desvio padrão de 12,8 (0,01 mm). As faixas foram levantadas após a conclusão da obra (Março/2012). A **Figura 37a** apresenta os dados levantados para a faixa I, e a **Figura 37b** os dados levantados para a faixa II.



(a)



(b)

Figura 37. Resultado do controle deflectométrico com a viga Benkelman, Faixas: (a) I e (b) II

A faixa II recebeu monitoramento por levantamento deflectométrico (**Figura 38**) no estágio intermediário da execução após a fresagem da espessura necessária de revestimento asfáltico, o que permitiu observar os seguintes pontos de interesse: o primeiro (I) e o segundo (II) segmentos tem condição estrutural mais íntegra, de modo que não houve aumento significativo nas deflexões após a fresagem, o terceiro (III) segmento mostrou uma variação de deflexão importante após a fresagem, com aumento significativo da média (de 67 x 0,01mm para 104 x 0,01 mm), o que indica baixa capacidade de suporte da estrutura remanescente, demonstrando a importância que o revestimento asfáltico tem para este segmento na resposta estrutural do conjunto, uma vez que este exercerá um papel de aumento de rigidez e, portanto, de diminuição da deflexão. Não foi realizado levantamento deflectométrico após a fresagem na faixa I devido a dificuldades operacionais durante a execução desta faixa.

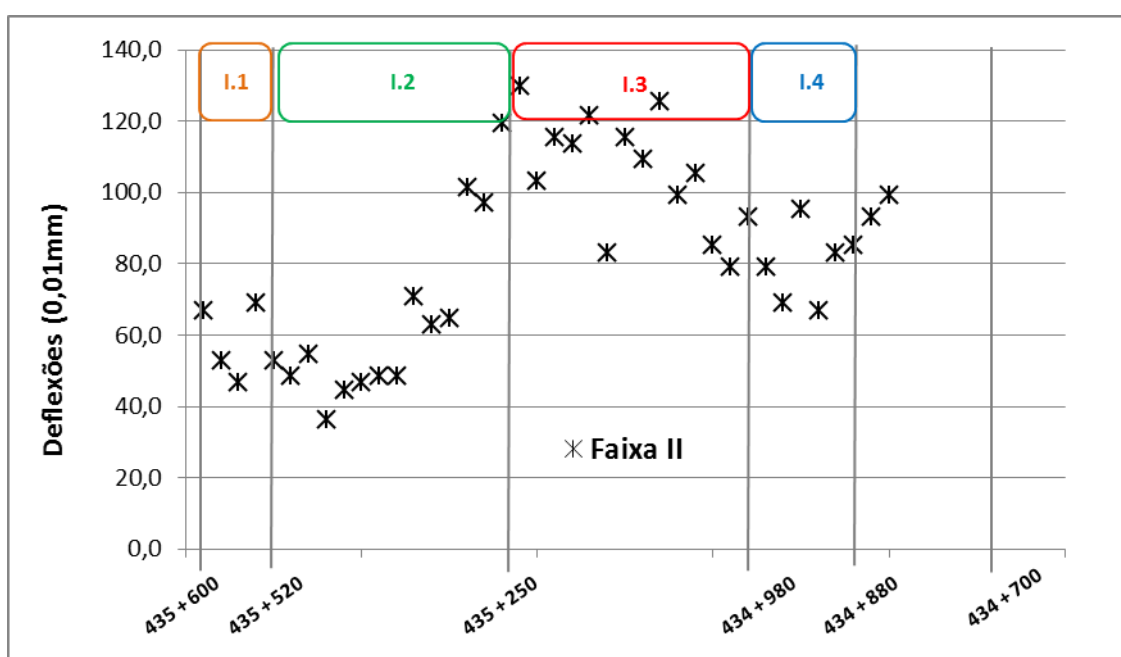


Figura 38. Resultado do controle deflectométrico na caixa fresada com a viga Benkelman - Faixa II

Estas duas constatações são fundamentais e vão de encontro ao propósito definido no projeto do trecho experimental com vistas à comparação de comportamento com SAMI, sobre duas estruturas distintas: (I) camada remanescente em mistura densa usinada a quente e, (II) camada remanescente mista em mistura densa usinada a quente e mistura reciclada a frio. Estima-se que a primeira estrutura tenha de fato maior capacidade

estrutural, sendo altamente indicado o tratamento com camada do tipo SAMI. No caso da segunda estrutura, com condição mais crítica, não são encontrados testes na literatura, propiciando uma análise mais detalhada sobre a aplicabilidade do SAMI, com definições claras de limitação neste caso, que serão verificadas no trecho experimental.

7.5 Ensaios de Comportamento Mecânico – Controle Tecnológico

7.5.1 Aderência entre Camadas – Leutner Test

A aderência entre as camadas do pavimento é de fundamental importância para que o mesmo trabalhe monoliticamente. Na execução em campo foi aplicada pintura de ligação cuja taxa adotada segue a recomendação definida em norma de resíduo de $0,3 \text{ L/m}^2$, com utilização de emulsão RR-1C modificada por SBS. Para avaliação, em laboratório, da aderência entre as camadas, adotou-se o método de ensaio alemão conhecido como *Leutner*, descrito a seguir.

O equipamento de cisalhamento direto conhecido por “*Leutner Shear Test*” foi desenvolvido na Alemanha em 1970 como uma forma simplificada de aplicar uma força cisalhante sobre a interface de duas camadas asfálticas. O ensaio é executado em corpos de prova de 150 mm diâmetro de pelo menos duas camadas asfálticas extraídas de campo ou reproduzidas em laboratório. O princípio do ensaio consiste em aplicar uma força cisalhante de forma que gere um deslocamento cisalhante na interface das camadas asfálticas. A velocidade do carregamento é de 50 mm/min e o ensaio é realizado na temperatura de 20°C. O acessório confeccionado para o propósito deste ensaio encontra-se ilustrado na **Figura 39a**. Este é constituído basicamente por duas peças semicirculares, superior e inferior, para corpos de prova de 150 mm, e também de 100 mm de diâmetro, e uma chapa de aço semicircular de corte, que recebe a carga aplicada. Para a realização dos ensaios, utilizou-se uma prensa MTS (**Figura 39b**) para garantir que a velocidade de carregamento seria mantida constante ao longo do ensaio. Os corpos-de-prova foram mantidos na temperatura de ensaio, 20°C, por um período de 12 horas, a fim de garantir uma distribuição uniforme da mesma ao longo da amostra.



(a)



(b)

Figura 39. (a) ilustração do acessório confeccionado para o ensaio de cisalhamento direto em amostras circulares, e (b) prensa MTS utilizada para o ensaio

Os corpos de prova extraídos de campo (das Faixas I e II) foram agrupados conforme ilustrado nas **Figuras 40 e 41** abaixo, de forma a facilitar um comparativo para as diferentes estruturas de pavimento dos trechos experimentais, apesar de o foco ter sido na aderência entre CBUQ e SAMI. Os resultados obtidos estão resumidos na **Figura 42**.

O valor geralmente adotado como limite para o ensaio de aderência pelo *Leutner* quando se usam camadas intermediárias tipo grelha, geomembranas, etc, é de 12kN em amostras de 150mm de diâmetro. As amostras extraídas dos trechos experimentais foram de 100 mm, levando a uma redução do valor limite para a faixa de 6kN (ponderando as áreas transversais do dois tamanhos de CPs). A média de todos os corpos de prova extraídos da Faixa I foi de 17,3 kN, com desvio padrão de 2,9 kN e para os corpos de prova da Faixa II obteve-se média de 17,7 kN e desvio padrão de 2,5 kN, corroborando a adequada aderência entre a camada asfáltica intermediária antireflexão de trinca e a capa de CBUQ.

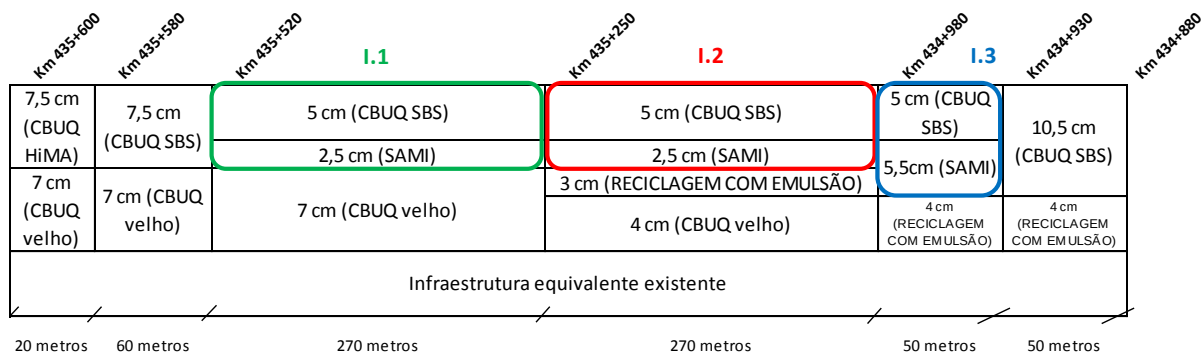


Figura 40. Ilustração da divisão dos grupos para ensaio de aderência – Faixa I

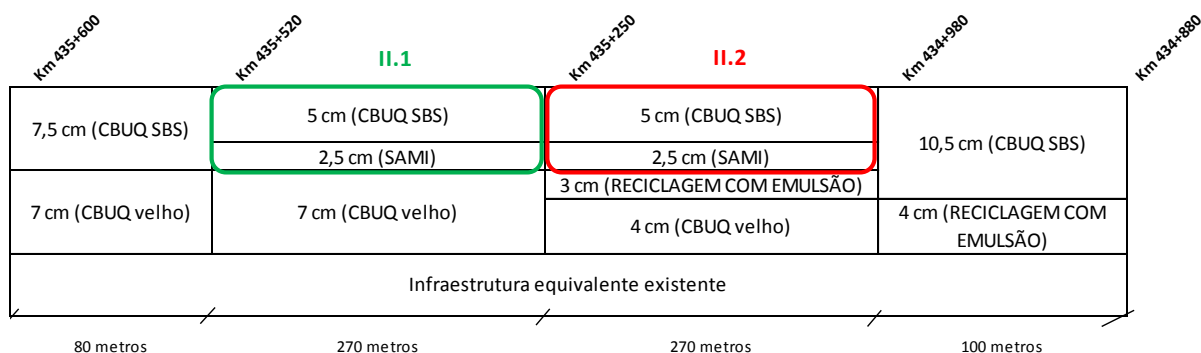


Figura 41. Ilustração da divisão dos grupos para ensaio de aderência – Faixa II

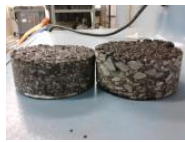
Faixa	Grupo	Pmax (kN)	Foto
I	I.1	15,5	
		12,9	
		15,5	
	I.2	16,8	
		16,0	
		17,2	
	I.3	19,5	
		22,3	
		20,2	
Faixa	Grupo	Pmax (kN)	Foto
II	II.1	16,3	
		13,8	
		20,5	
	II.2	20,0	
		18,6	
		16,8	

Figura 42. Resultados de aderência entre CBUQ e SAMI

7.5.2 Parâmetros Volumétricos

Após o ensaio de aderência, procedeu-se a determinação dos parâmetros volumétricos das misturas asfálticas componentes das camadas de CBUQ. O SAMI, por ser uma camada muito delgada, não pode ser reaproveitado após o ensaio de aderência. As **Figuras 43 e 44** apresentam os resultados de volume de vazios para as Faixas I e II, respectivamente. Foi observado um volume de vazios superior ao estabelecido no projeto das misturas, o que

pode ter sido ocasionado por alguns fatores: (i) compactação parcial da camada; (ii) variação na Gmm; (iii) variação no teor de CAP e granulometria das misturas (mesmo dentro da variação aceita pela especificação de serviço). Um volume de vazios superior interfere de forma direta nos parâmetros mecânicos obtidos em laboratório, conforme abordado nos itens a seguir. O volume de vazios apontado pelo controle tecnológico da obra foi da ordem de 8,0%.

I.1 Km 435+600		I.2 Km 435+580		I.3 Km 435+520		I.4 Km 435+250		I.5 Km 434+980		I.6 Km 434+930		Km 434+880	
7,5 cm (CBUQ HiMA)		7,5 cm (CBUQ SBS)		5 cm (CBUQ SBS) 2,5 cm (SAMI)		5 cm (CBUQ SBS) 2,5 cm (SAMI)		5 cm (CBUQ SBS)		10,5 cm (CBUQ SBS)			
7 cm (CBUQ velho)		7 cm (CBUQ velho)		7 cm (CBUQ velho)		3 cm (RECICLAGEM COM EMULSÃO) 4 cm (CBUQ velho)		5,5cm (SAMI) 4 cm (RECICLAGEM COM EMULSÃO)		4 cm (RECICLAGEM COM EMULSÃO)			
Infraestrutura equivalente existente													
20 metros		60 metros		270 metros		270 metros		50 metros		50 metros			
Volume de Vazios (%)	10,0	8,5	9,1		8,7		6,8		8,5				
	10,8	8,2	8,1		8,4		7,6		7,3				
	12,1	9,1	8,8		8,5		7,5		7,8				
	11,1	8,8					8,0		7,3				

Figura 43. Volume de vazios das misturas asfálticas tipo CBUQ – Faixa I

Km 435+600 II.1		Km 435+520 II.2		Km 435+250 II.3		Km 434+980 II.4		Km 434+880	
7,5 cm (CBUQ SBS)		5 cm (CBUQ SBS)		5 cm (CBUQ SBS)		10,5 cm (CBUQ SBS)			
		2,5 cm (SAMI)		2,5 cm (SAMI)					
7 cm (CBUQ velho)		7 cm (CBUQ velho)		3 cm (RECICLAGEM COM EMULSÃO)		4 cm (RECICLAGEM COM EMULSÃO)			
				4 cm (CBUQ velho)					
Infraestrutura equivalente existente									

80 metros		270 metros		270 metros		100 metros	
Volume de Vazios (%)	7,20	7,86	8,19	7,69			
	7,63	8,85	7,25	8,91			
	7,20	7,34	7,62	7,74			
	7,69	7,57		8,06			
				9,47			

Figura 44. Volume de vazios das misturas asfálticas tipo CBUQ – Faixa II

7.5.3 Resistência à Tração por Compressão Diametral

Após os ensaios de módulo de resiliência, realizou-se o ensaio de resistência à tração por compressão diametral modificado (velocidade de carregamento de 1mm/min) nos mesmos

CPs dos ensaios de MR. As Figuras 45 e 46 apresentam os resultados, onde observa-se valores baixos não somente pelo volume de vazios elevados, como também pelo baixa velocidade de deslocamento da prensa.

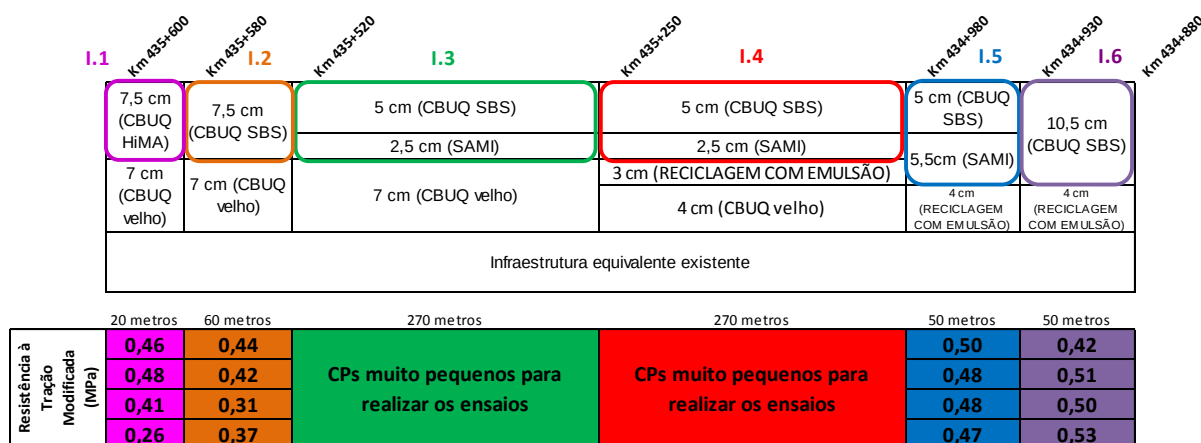


Figura 45. Resistência à tração por compressão diametral modificada das misturas asfálticas tipo CBUQ – Faixa I

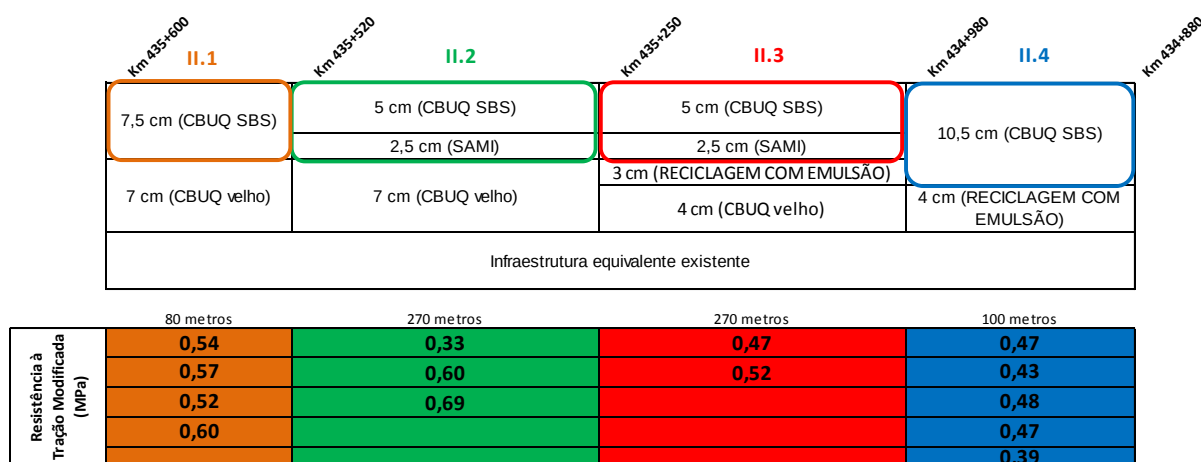


Figura 46. Resistência à tração por compressão diametral modificada das misturas asfálticas tipo CBUQ – Faixa II

7.5.4 Módulo de Resiliência

Os corpos de prova das camadas de CBUQ após passarem por determinação do volume de vazios procederam ao ensaio de módulo de resiliência. Os resultados obtidos estão apresentados nas Figuras 47 e 48. Os corpos de prova das camadas de CBUQ 5cm não puderam ser ensaios, devido a reduzida dimensão dos mesmos, conforme apresentado anteriormente, na Tabela 7. Conforme esperado, os resultados de MR também foram

inferiores aos obtidos na fase de projeto das misturas, devido: (i) aumento no volume de vazios; (ii) diferença na forma de compactação em campo e em laboratório; (iii) possíveis variações de teor de CAP e granulometria.

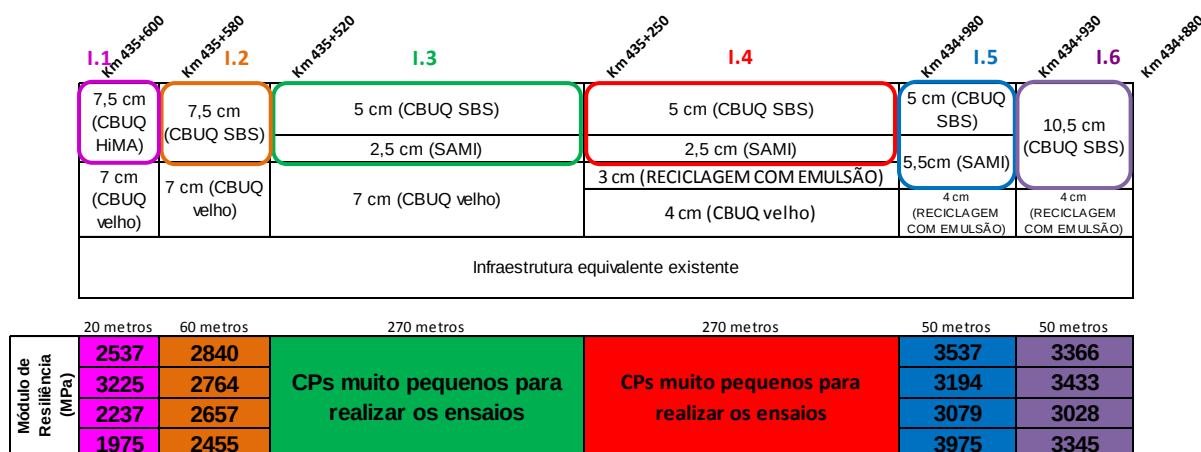


Figura 47. Módulo de Resiliência das misturas asfálticas tipo CBUQ – Faixa I

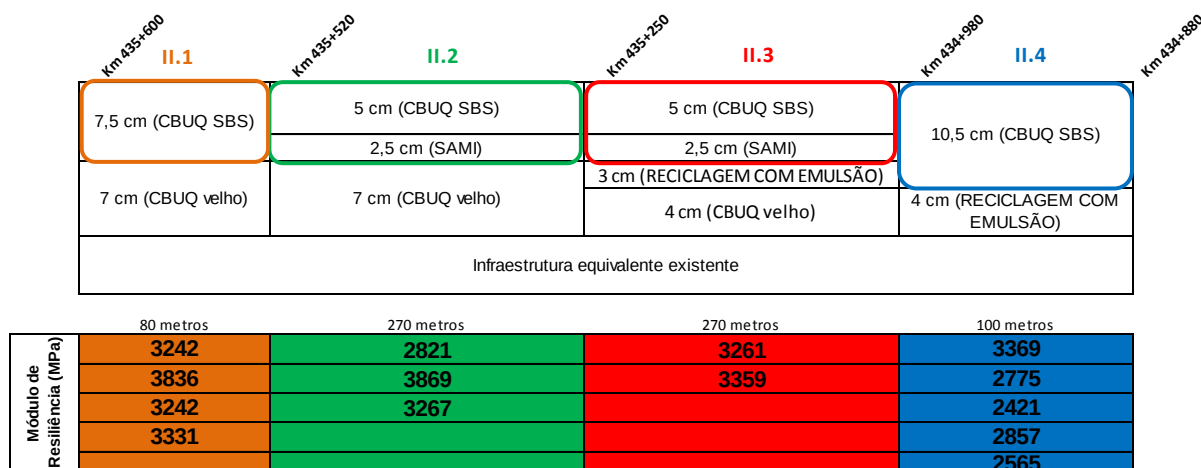


Figura 48. Módulo de Resiliência das misturas asfálticas tipo CBUQ – Faixa II

7.6 Monitoramento – Condições Estruturais

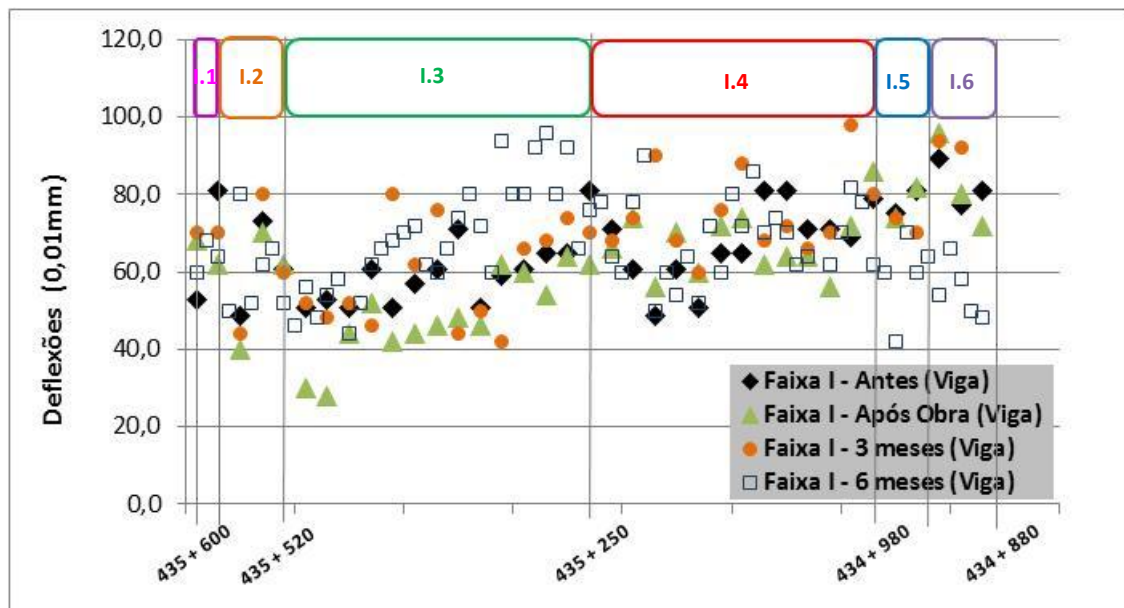
Desde a construção do trecho experimental, as condições estruturais têm sido monitoradas por meio de medidas de deflexão a partir de dois equipamentos: (i) viga Benkelman e (ii) Falling Weight Deflectometer – FWD. O levantamento das deformações recuperáveis com uso de Viga Benkelman foi realizado na etapa de construção (antes e imediatamente após a restauração), e após esta etapa, periodicamente a cada três meses.

O equipamento, com uso amplamente difundido no Brasil, tem funcionamento simplificado, com aplicação de carga estática por meio de roda dupla traseira de caminhão basculante padronizado; as leituras são realizadas ponto a ponto, sendo possível, apesar da baixa produtividade, a medida em diversos distanciamentos (série de leituras intermediárias) em relação ao ponto de aplicação de carga. O equipamento FWD, por sua vez, tem aplicação de carga dinâmica por impacto, com leituras previamente definidas a partir de um conjunto de sete sensores posicionados longitudinalmente a partir do centro da placa de aplicação de carga. Os equipamentos são apresentados na **Figura 49**.

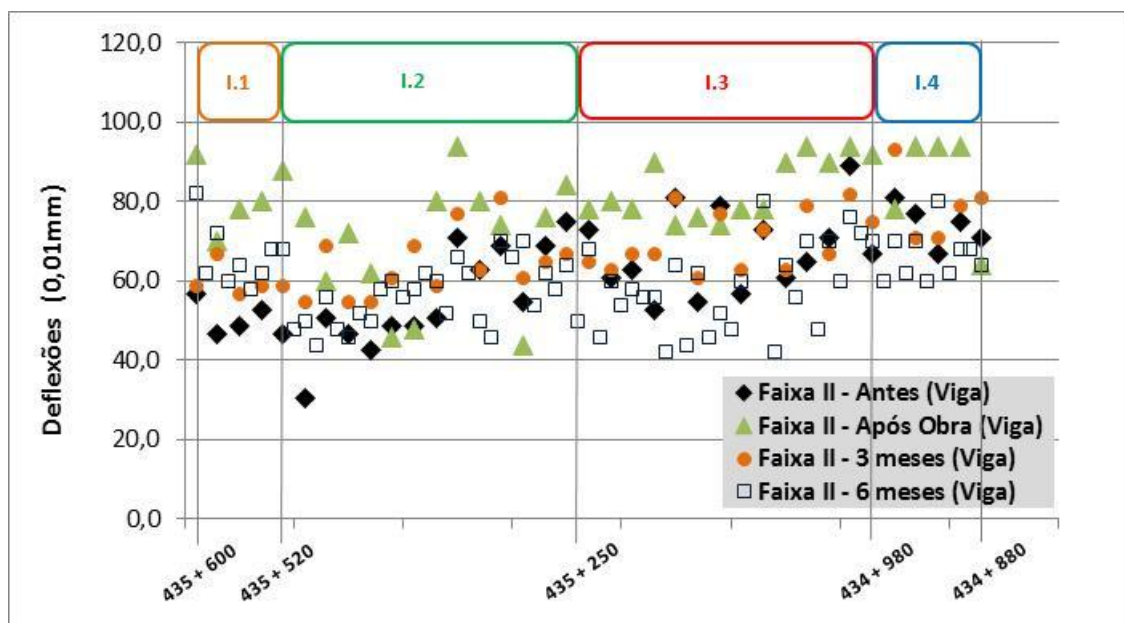


Figura 49. Equipamentos de medidas de deflexão: (a) viga Benkelman e (b) FWD

Na **Figura 50** são apresentados os resultados do levantamento deflectométrico realizado com o uso da Viga Benkelman após 3 e 6 meses da execução do trecho experimental. Observa-se, dos resultados obtidos, que as deflexões da Faixa I (**Figura 50a**), apesar de estarem mais ou menos no mesmo patamar da Faixa II (**Figura 50b**), apresentaram uma menor redução em relação aos dados coletados logo após a execução da obra. Até o presente momento, ainda não foi possível verificar diferenças de deflexão consideráveis do comportamento do SAMI quando aplicado acima de uma camada densa (CBUQ antigo) e acima de uma camada mais aberta (reciclado com emulsão). O SAMI, por não ser considerado uma camada estrutural, deve manter o patamar de deflexão semelhante de um CBUQ, levando em consideração diferenças de espessura das camadas.



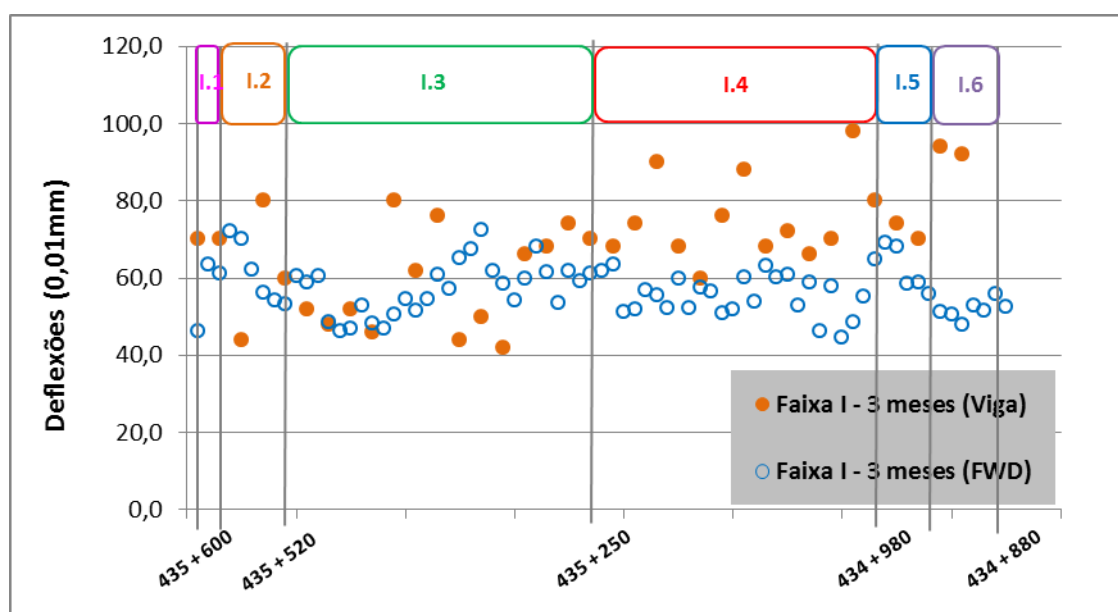
(a)



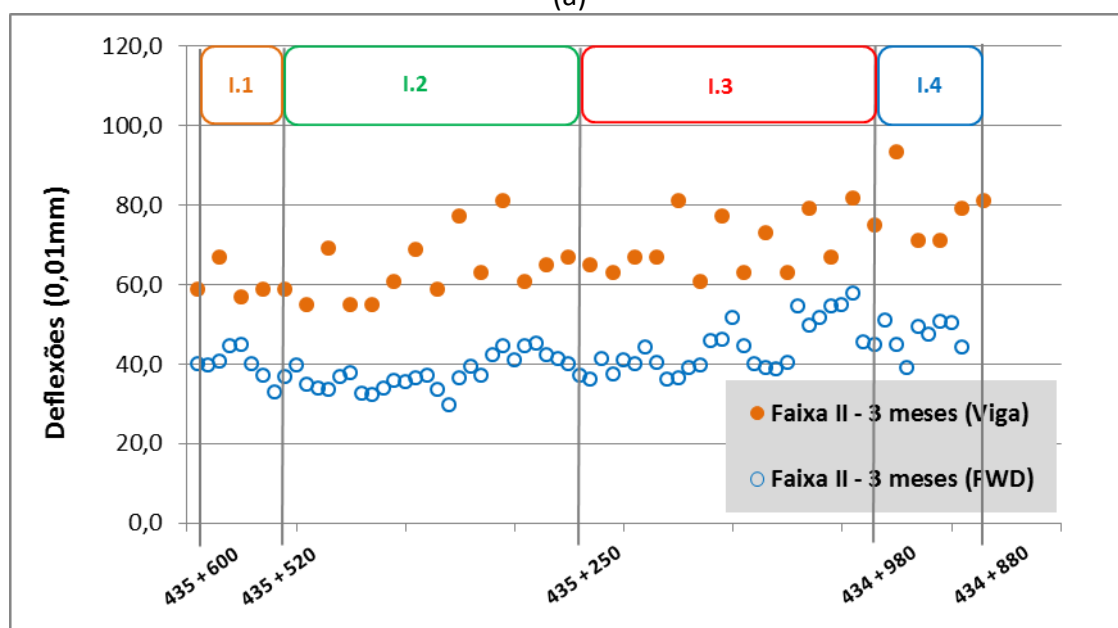
(b)

Figura 50. Resultado do controle deflectométrico: (a) Faixa I, e (b) Faixa II

Em julho de 2012, 3 meses após a construção do trecho experimental, realizou-se também levantamento deflectométrico com FWD nas faixas I e II, onde foram levantadas as bacias de deflexão. Os dados de deflexão máxima estão apresentados na **Figura 51a e 51b**. Observa-se que os dados levantados com o FWD apresentaram dispersão bem inferior aos obtidos pela viga Benkelman, além de menores deflexões máximas, no geral. As bacias de deflexão (FWD) foram adotadas para o cálculo do módulo das camadas (retroanálise), conforme abordado a seguir.



(a)



(b)

Figura 51. Comparativo dos resultados obtidos com a viga Benkelman e com o FWD nas Faixas: (a) I e (b) II

7.7 Retroanálise

O processo de retroanálise consiste da utilização de medidas de bacias de deflexões e da espessura das camadas do pavimento, para o cálculo dos módulos de resiliência das diversas camadas do pavimento. Com o auxílio do software BAKFAA, foram obtidos os valores de módulos das misturas asfálticas estudadas (SPV19mm HiMA, SPV19mm SBS e SAMI), ilustradas na **Figura 52**. Nestes trechos experimentais foram construídos os novos revestimentos asfálticos – camada de rolamento, e em alguns ainda o SAMI entre as camadas antigas e o revestimento novo. Os dados de bacias de deflexão utilizados na retroanálise foram obtidos por ensaios com FWD (*Falling Weight Deflectometer*). O resumo da retroanálise encontra-se na **Tabela 8**. A bacia determinada pelo FWD, bem como a bacia retroanalizada e os valores de módulo encontram-se apresentados no **ANEXO B** deste relatório.

Km 435+600	Km 435+580	Km 435+520	Km 435+250	Km 434+980	Km 434+930	Km 434+880
7,5 cm (CBUQ HiMA)	7,5 cm (CBUQ SBS)	5 cm (CBUQ SBS)	5 cm (CBUQ SBS)	5cm (CBUQ SBS)	10,5 cm (CBUQ SBS)	
		2,5 cm (SAMI)	2,5 cm (SAMI)	2,5 cm (SAMI)		
7 cm (CBUQ velho)	7 cm (CBUQ velho)	7 cm (CBUQ velho)	3 cm (RECICLAGEM COM EMULSÃO)	7 cm (RECICLAGEM COM EMULSÃO)	4 cm (RECICLAGEM COM EMULSÃO)	
			4 cm (CBUQ velho)			
		Infraestrutura equivalente existente				
20 metros	60 metros	270 metros	270 metros	50 metros	50 metros	
1.I	1.II	1.III	1.IV	1.V	1.VI	

(a)

Km 435+600	Km 435+520	Km 435+250	Km 434+980	Km 434+880
7,5 cm (CBUQ SBS)	5 cm (CBUQ SBS)	5 cm (CBUQ SBS)	10,5 cm (CBUQ SBS)	
	2,5 cm (SAMI)	2,5 cm (SAMI)		
7 cm (CBUQ velho)	7 cm (CBUQ velho)	3 cm (RECICLAGEM COM EMULSÃO)	4 cm (RECICLAGEM COM EMULSÃO)	
		4 cm (CBUQ velho)		
	Infraestrutura equivalente existente			
80 metros	270 metros	270 metros	100 metros	
2.I	2.II	2.III	2.IV	

(b)

Figura 52. Estruturas adotadas na Retroanálise: (a) Faixa I, e (b) Faixa II

Tabela 8. Resumo Retroanálise

Segmento	Módulo (Retroanálise) - MPa		
	CBUQ HiMA	CBUQ SBS	SAMI
1.I	2655	-	-
1.II	-	2796	-
1.III	-	2696	1819
1.IV	-	3176	1950
1.V	-	3536	1875
1.VI	-	3355	-
2.1	-	3288	-
2.II	-	3278	1860
2.III	-	2732	1725
2.IV	-	2943	-

7.8 Análise de Sensibilidade (estudo paramétrico)

A análise de sensibilidade realizada a partir de simulações no programa Elsym 5, com as considerações apresentadas na **Figura 53**, sobre estruturas com camada intermediária anti reflexão de trincas (SAMI) indica que esta camada não contribui estruturalmente para a redução da deflexão sofrida no topo do revestimento, mesmo sob variações importantes nos valores de módulo de resiliência considerados.

ELASTIC LAYER DATA				
Number of layers: 4				
Layer Number	Thickness <inches>	Poisson's Ratio	Modulus of Elasticity	
1	3.00	.30	35000.00	
2	2.50	.45	12000.00	
3	20.00	.40	2000.00	
4	.00	.40	1000.00	
*Note: Enter Zero thickness when bottom layer is semi-infinite.				

Estrutura simulada	Variáveis consideradas
CBUQ	Espessura 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12 e 13 cm
SAMI	MR 1.200 a 3.000 Mpa
Camada trincada (MR equivalente)	MR 200, 400, 600, 800 e 1.000 MPa
Subleito Homogêneo	MR 100 MPa

Figura 53. Características consideradas na simulação

As Figuras 54 a 56 apresentam os resultados da análise de sensibilidade. O comportamento do pacote estrutural avaliado foi influenciado de modo mais pronunciado pela variação na condição estrutural (rigidez) oferecida pela camada remanescente sob o SAMI; este indicador pode representar um fator limitador para a aplicação desta técnica, tendo em vista que a deformação na fibra inferior do SAMI diminui proporcionalmente ao aumento no módulo de resiliência equivalente das camadas subjacentes (o que ocorre normalmente em qualquer camada asfáltica). A espessura de revestimento asfáltico tem influência mais importante se o módulo equivalente do remanescente for baixo. Caso contrário, as deformações de tração no SAMI são pouco afetadas.

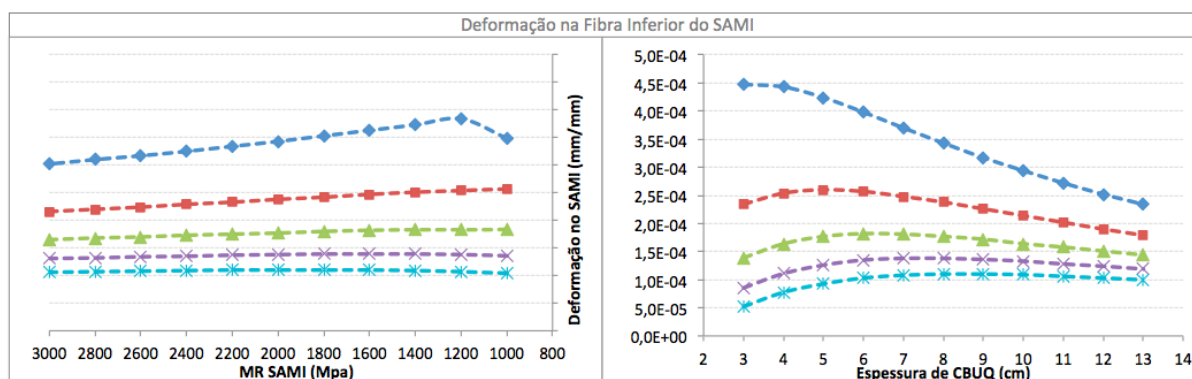


Figura 54. Resultados da simulação (Deformação na fibra inferior do SAMI)

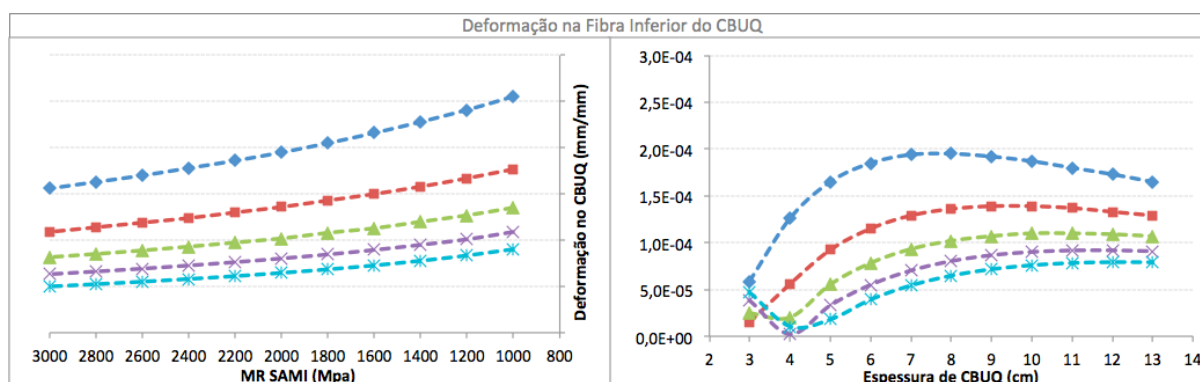


Figura 55. Resultados da simulação (Deformação na fibra inferior do CBUQ)

No caso da avaliação das tensões que solicitam o SAMI, procurou-se identificar condições favoráveis de alocação na estrutura, de modo que a deformação limitada garanta maior vida de fadiga ao material. Finalmente, deve-se reafirmar que o SAMI não é uma camada para a redução de deflexão (reforço), mas para trabalhar como um redutor de reflexão de trincas, com um funcionamento estrutural totalmente diferente de camadas asfálticas de revestimento.

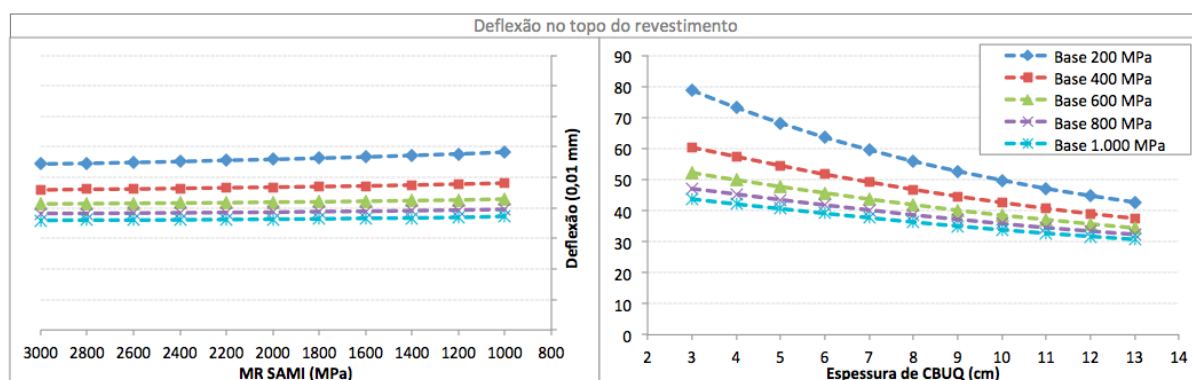


Figura 56. Resultados da simulação (Deflexão no topo do revestimento)

7.9 Monitoramento – Condições Funcionais

O trecho experimental tem sido monitorado no que tange às suas condições funcionais, a partir de levantamentos visuais periódicos. Embora o período seja razoavelmente curto, desde a execução, devido ao elevado tráfego solicitante, são observados importantes resultados de desempenho, pela comparação entre os segmentos. Foram identificados trincamentos variáveis em cada segmento, de modo que a mensuração dos defeitos nas duas faixas de tráfego foi realizada a partir de equipamento específico, conforme apresentado na **Figura 57**.



Figura 57. Condições funcionais avaliadas nas duas faixas de tráfego com equipamento específico no trecho experimental

O veículo é equipado com sensores a laser integrados, com capacidade para captar todas as características superficiais do pavimento, tais como perfil longitudinal e transversal, além de distâncias georeferenciadas e defeitos. Os dados compilados são agrupados conforme apresentado na **Figura 58**.

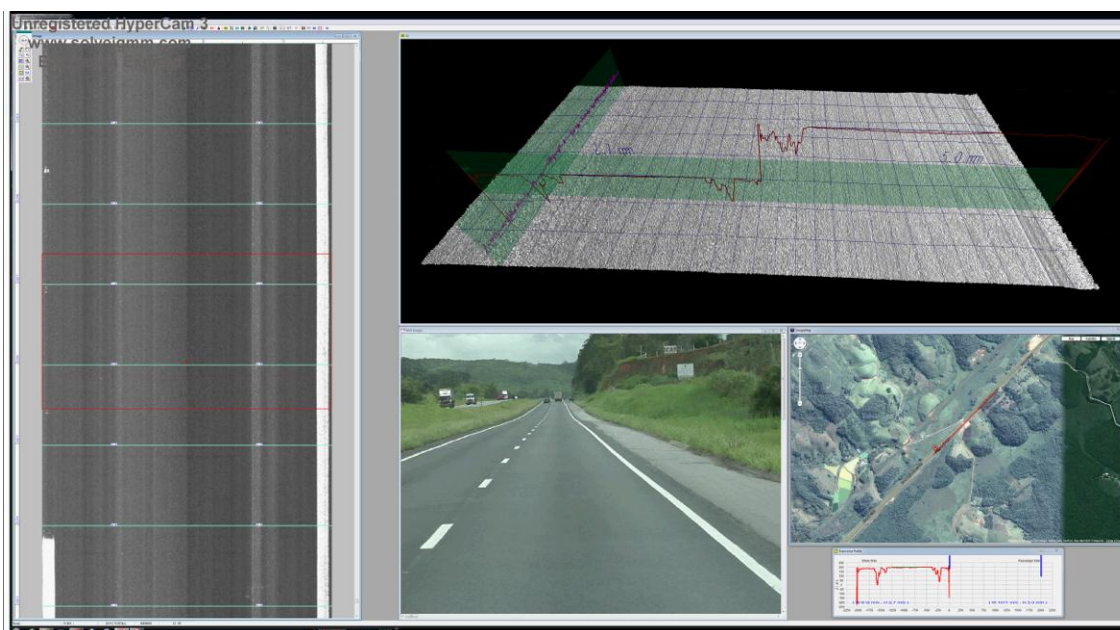


Figura 58. Dados de levantamento de condições funcionais

O levantamento realizado em janeiro/2013, após 10 meses da execução indicou a presença de trincamentos e fissuras em todos os segmentos, com distinções bastante claras, conforme apresentado na **Tabela 9**.

Tabela 9. Resultados do levantamento funcional

Defeito	FAIXA 2			
	Segmento I	Segmento II	Segmento III	Segmento IV
Trincas interligadas	2,47m ²	-	-	0,41m ²
Trincas longitudinais	-	-	0,09m ²	0,55m ²
Trincas Transversais	0,97m ²	-	-	1,49m ²
Fissuras	12,46m ²	0,27m ²	2,48m ²	4,94m ²

Não é possível concluir categoricamente, mas é possível verificar uma tendência de desempenho entre os segmentos:

A estrutura existente sob a camada de SAMI pode ter afetado o desempenho do pavimento, de modo que o segmento III, com camada de base mista em CBUQ e PMF, que apresentava desde o princípio, níveis deflectométricos mais pronunciados, indica até o momento que o SAMI resistiu menos, com reflexão de trincas e fissuras somando um total de 2,57 m², dos

quais se destaca em sua maioria como fissuras. O segmento com camada subjacente em CBUQ tem melhor desempenho, apresentando apenas 0,27 m² de fissuras.

A comparação entre os segmentos I e II, cuja espessura total executada de 7,5 cm é a mesma sobre a base remanescente em CBUQ deteriorado, contando apenas com a variação pela presença da camada de SAMI, indica resultados muito distintos, com evidente reflexão precoce de trincas no segmento I, conforme se verifica na **Figura 59**.



Figura 59. Divisa entre os segmentos I e II, com maior área de trincamentos no primeiro

A comparação entre os segmentos I e IV por sua vez (**Figura 60**), indica que a maior espessura de revestimento teve efeito para mitigar a reflexão de trincas, conforme se espera, contudo cabe ressaltar que o segmento IV recebeu camada de revestimento em CBUQ, sendo apoiado sob camada de PMF, com reconhecida capacidade de suporte inferior. Ainda em comparação com o segmento III, cuja base remanescente se assemelha, o desempenho do segmento IV foi inferior, com maior área fissurada além de trincas.



Figura 60. Segmento I (a) com maior área de trincamento do que o segmento IV (b)

A faixa I também foi monitorada, contudo, não apresenta até o momento defeitos como trincamento, fissuras ou deformações, conforme se verifica na **Figura 61**.



Figura 61. Faixa I à direita sem defeitos funcionais

8 AVALIAÇÃO LABORATORIAL DAS MISTURAS APLICADAS NO TRECHO EXPERIMENTAL

As misturas aplicadas no trecho experimental já haviam passado por um processo de dosagem, bem como avaliação de algumas propriedades mecânicas. Optou-se, porém, por uma investigação mais detalhada desses materiais, conforma abordado nos **ítems 8.1 e 8.2** a seguir.

8.1 Ensaios Reológicos nos Ligantes Asfálticos

As propriedades reológicas vêm se tornando cada vez mais importantes para o conhecimento e melhor caracterização dos materiais asfálticos. A reologia descreve a deformação de um corpo sob a influência de tensões e o ligante asfáltico é um material que tem propriedades muito distintas e variáveis a depender das condições em que o mesmo é avaliado, tendo influência: a temperatura, a frequência, a forma de carregamento, etc.

O ligante asfáltico nem pode ser considerado um sólido ideal (que se deforma elasticamente), como também não pode ser considerado um fluido ideal (que se deforma irreversivelmente). A maior parte dos ensaios tradicionais de caracterização de asfaltos enquadra-se em uma linha de testes empíricos, onde muitas vezes não é possível quantificar vantagens no uso de modificadores em diferentes condições de temperatura.

Dentro da temática proposta para os trechos experimentais desse projeto, foram realizados alguns ensaios reológicos para a complementação da caracterização dos dois ligantes asfálticos: (i) CAP modificado por SBS 60/85, e (ii) CAP altamente modificado por polímero SBS, HiMA. Os ligantes passaram pelos ensaios de varredura de frequência e temperatura (descrito no **item 8.1.1** a seguir) e pelo ensaio de *Multiple Stress Creep and Recovery*, MSCR (descrito no **item 8.1.2** a seguir). Para ambos os ensaios utilizou-se o reômetro de cisalhamento dinâmico do Laboratório de Mecânica dos Pavimentos (LMP), da Universidade Federal do Ceará (UFC) ilustrado na **Figura 62**.



Figura 62. Reômetro de cisalhamento dinâmico do LMP/UFC

Os ligantes também passaram por uma simulação do envelhecimento de curto prazo através do *Rolling Thin Film Oven Test* (RTFOT), conforme ilustrado na **Figura 63**, a fim de verificar possíveis mudanças de propriedades após o aquecimento dos ligantes durante a usinagem das misturas asfálticas.



Figura 63. Estufa de Filme Fino Rotativo – RTFOT (simulação do envelhecimento de curto prazo)

8.1.1 Varredura de Frequência e Temperatura

A obtenção dos parâmetros reológicos em diferentes temperaturas (58 a 88°C) e frequências (0,1 a 100Hz) permitiu um comparativo do comportamento tanto da amostra de HiMA como da amostra de SBS 60/85 em diferentes condições em que ambos os ligantes pudessem estar aplicados campo. Adotaram-se temperaturas elevadas por limitações de tempo para aquisição dos dados em temperaturas mais baixas. Porém, a aquisição dos dados em frequências mais elevadas fornece informações equivalentes a temperaturas menores testadas em frequências menores (superposição tempo-temperatura). As **Figuras 64 a 69** apresentam os resultados obtidos em cada uma das temperaturas analisadas. O salto de temperatura foi realizado a cada 6°C, conforme previsto na especificação Superpave para caracterização de ligantes asfálticos.

Observa-se dos dados apresentados abaixo, que o ligante altamente modificado apresenta melhor comportamento principalmente nas situações mais críticas (alta temperatura e baixa frequência), onde este apresenta:

- (i) um menor decréscimo do módulo cisalhante com o aumento da temperatura; e
- (ii) uma menor diferença entre os valores da amostra virgem e da amostra após o envelhecimento de curto prazo.

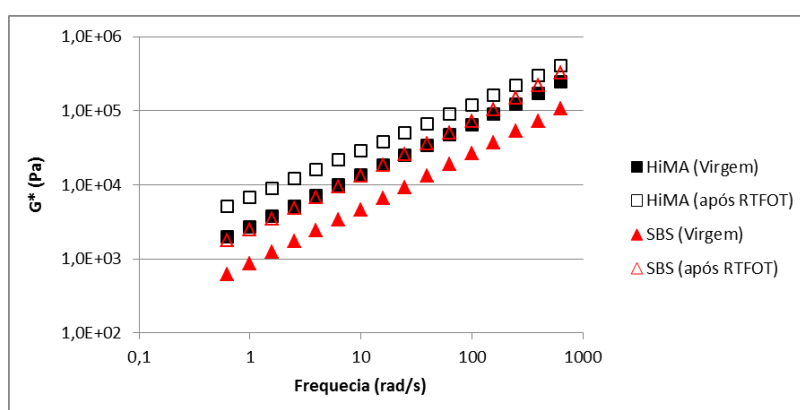


Figura 64. Varredura de frequência a 58°C

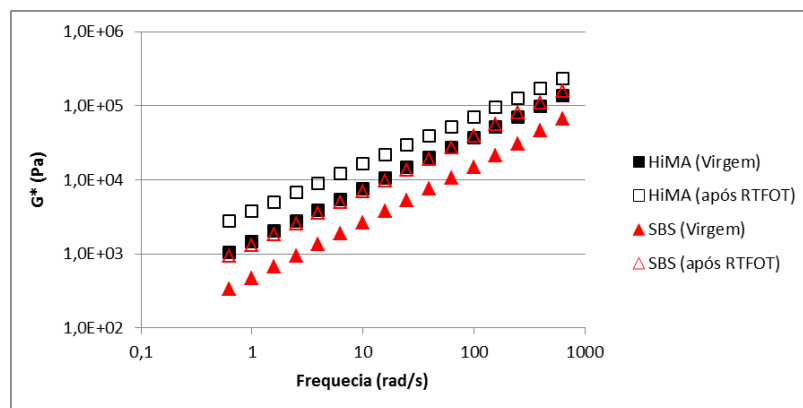


Figura 65. Varredura de frequência a 64°C

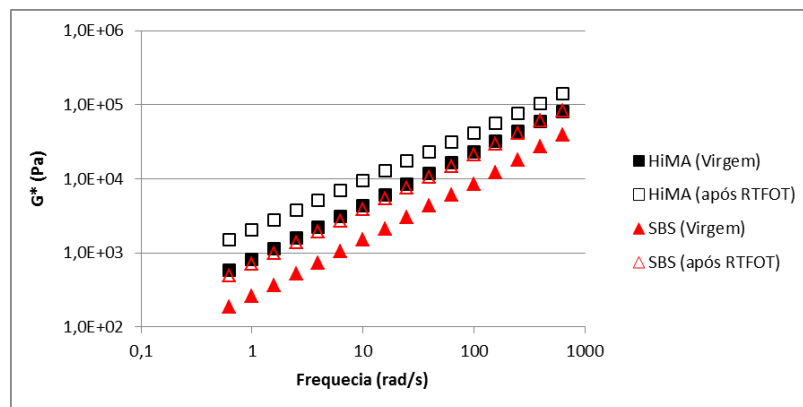


Figura 66. Varredura de frequência a 70°C

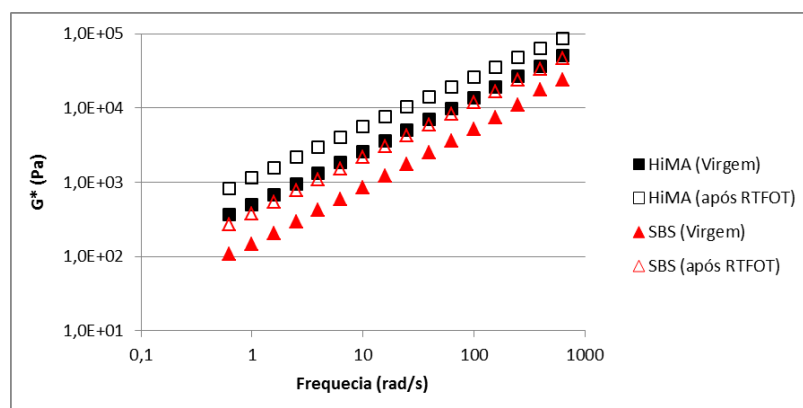


Figura 67. Varredura de frequência a 76°C

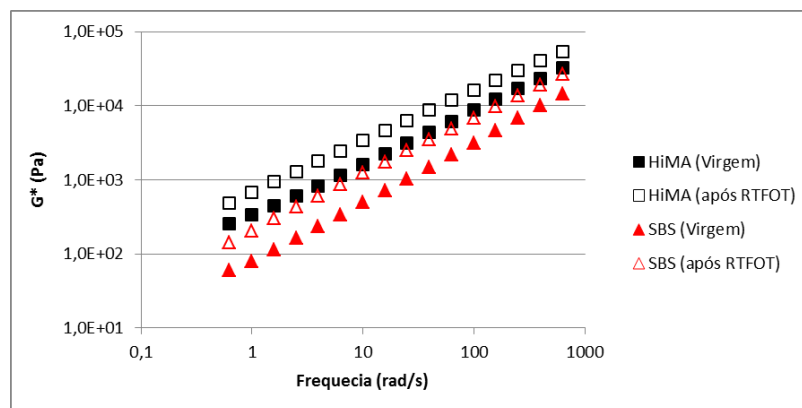


Figura 68. Varredura de frequência a 82°C

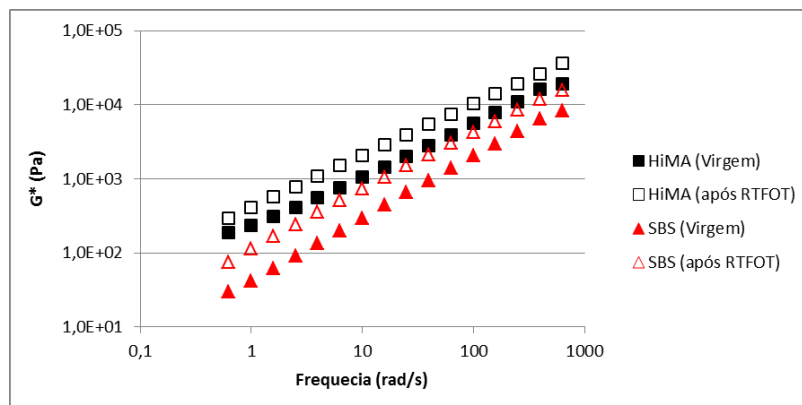


Figura 69. Varredura de frequência a 88°C

A alta elasticidade do HiMA pode ser percebida mesmo em temperaturas elevadas, conforme ilustrado na **Figura 70**.



Figura 70. Ilustração da amostra de HiMA após o ensaio a 88°C

8.1.2 MSCR

O ensaio MSCR foi desenvolvido baseado no trabalho de fluência (*creep*) e recuperação em ligantes asfálticos e misturas. O ensaio, publicado através da especificação AASHTO TP70, captura a função fluência não recuperável (J_{nr}) e o percentual de recuperação durante cada ciclo de carregamento. Os valores são reportados como média de 10 ciclos para cada nível de tensão, conforme representação esquemática da **Figura 71**.

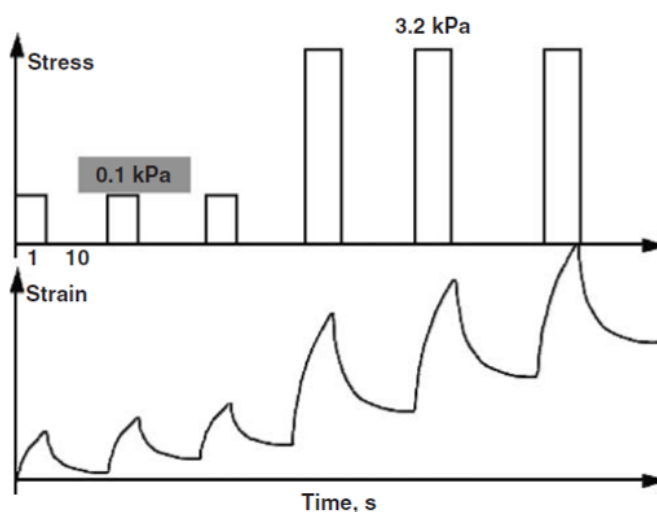
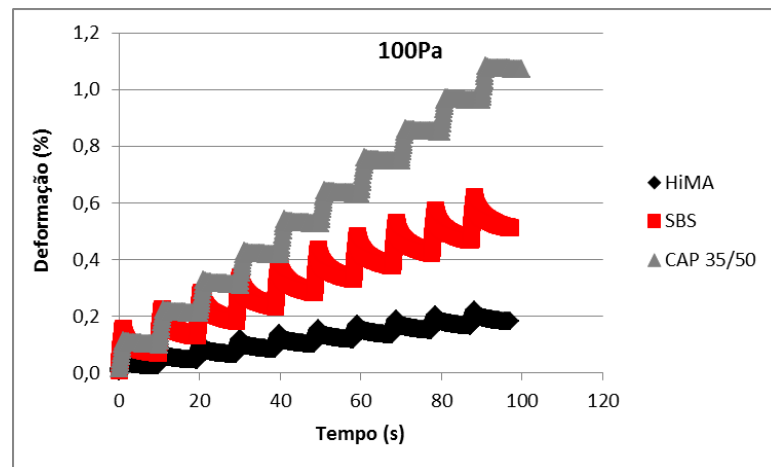


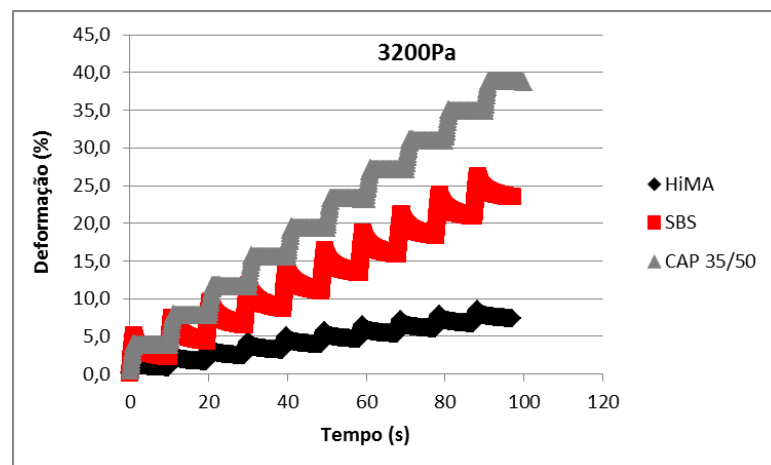
Figura 71. Representação esquemática da sequência do ensaio de MSCR, ilustrando os dois níveis de tensão (D'Angelo e Dongre, 2009)

Pesquisas realizadas nos EUA apontam que os dados obtidos através do ensaio de MSCR apresentam uma clara correlação entre o percentual de recuperação e o percentual de deformação na porção de *creep* (ou carregamento) do ensaio. O procedimento facilita a avaliação de como a resposta do ligante asfáltico irá mudar sob diferentes condições de tensão. Nas **Figuras 72a e 72b** estão ilustrados os resultados obtidos durante o ensaio para os dois níveis de carregamento especificados em norma (ASTM D 7405 - *Standard Test Method for Multiple Stress Creep and Recovery (MSCR) of Asphalt Binder Using a Dynamic Shear Rheometer*). Além dos dois ligantes utilizados nos trechos experimentais (HiMA e SBS 60/85), estão apresentados os dados de um terceiro ligante (não modificado), a fim de melhor ilustrar as diferenças de comportamento dos ligantes com diferentes níveis de incorporação de polímero. Vale salientar que o ensaio MSCR é geralmente realizado no

ligante após RTFOT, onde parte de suas propriedades elásticas podem ter sido perdidas durante o envelhecimento de curto prazo.



(a)



(b)

Figura 72. Resultados do ensaio de *Multiple Stress Creep and Recovery* para: (a) 100Pa e (b) 3200Pa

O parâmetro J_{nr} é determinado através da razão entre a deformação não recuperável da amostra ao final da porção de descarregamento, e a tensão inicial aplicada na porção de carregamento. A **Figura 73** apresenta o resultado de J_{nr} para os três ligantes testados, onde claramente observa-se uma menor tendência do HiMA de deformar-se permanentemente.

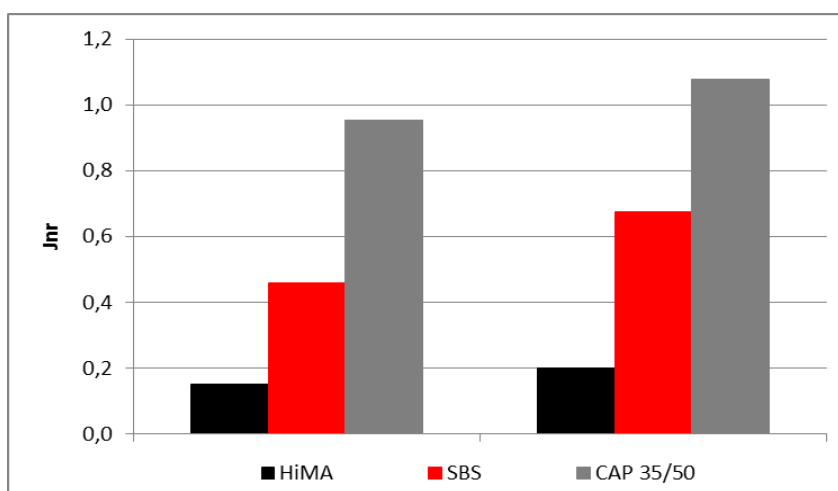


Figura 73. Função fluência não recuperável para os três ligantes avaliados

No trabalho desenvolvido por D'Angelo e Dongre (2009), os autores propuseram uma alteração na designação da temperatura alta do PG (especificação Superpave), de forma que a partir dos resultados de MSCR (J_{nr}), os ligantes seriam classificados para diferentes níveis de tráfego, conforme ilustrado na **Tabela 10**. Pelos dados apresentados, apenas os ligantes modificados poderiam ser aplicados em vias de tráfego muito pesado.

Tabela 10. Proposta para uma nova designação de temperatura alta do PG para PG 64-XX

Nova Designação para PG	Valor do Parâmetro J_{nr}	Nível de Tráfego de Projeto
PG 64S-XX	Menor ou igual a 4,0	Padrão
PG 64H-XX	Menor ou igual a 2,0	Pesado
PG 64V-XX	Menor ou igual a 1,0	Muito Pesado

Dos ensaios reológicos realizados nos dois ligantes asfálticos do trecho experimental, foi possível observar que o HiMA apresentou comportamento superior no que diz respeito a susceptibilidade térmica, além de uma maior elasticidade quando comparado ao ligante SBS.

Essas informações mostram que o HiMA, aplicado em uma camada de SAMI, apresenta maior capacidade de absorver as tensões que por ventura sejam geradas nas trincas da infraestrutura remanescente.

8.2 Corpos de Prova Moldados em Laboratório

Após a execução dos trechos experimentais, realizou-se uma análise mais detalhada das misturas aplicadas em campo através de ensaios mecânicos em corpos de prova moldados em laboratório. As misturas são: (i) SPV19mm SBS 60/85, (ii) SPV19mm HiMA, e (iii) SAMI. Adicionou-se às misturas do trecho experimental, uma mistura com a mesma granulometria SPV19mm, porém com o uso de ligante convencional, CAP 30/45.

Vinte e cinco corpos de prova foram moldados em laboratório através do compactador giratório Superpave (apesar da mistura SPV19mm SBS 60/85 ter sido originalmente dosada pela metodologia Marshall), com 150mm de diâmetro e aproximadamente 115mm. A idéia de produção de corpos de prova grande era de reduzir a variabilidade da amostra que seria levada aos ensaios mecânicos (centro do corpo de prova grande). A moldagem do SAMI foi mantida conforme projeto da mistura, tendo 100mm de diâmetro e aproximadamente 65mm de altura. Os CPs de 150mm x 115mm das misturas SPV foram broqueados e serrados, de forma a deixá-los na dimensão de um CP Marshall (100mm de diâmetro e 63,5mm de altura) para a realização dos ensaios mecânicos, conforme ilustrado na **Figura 74**.

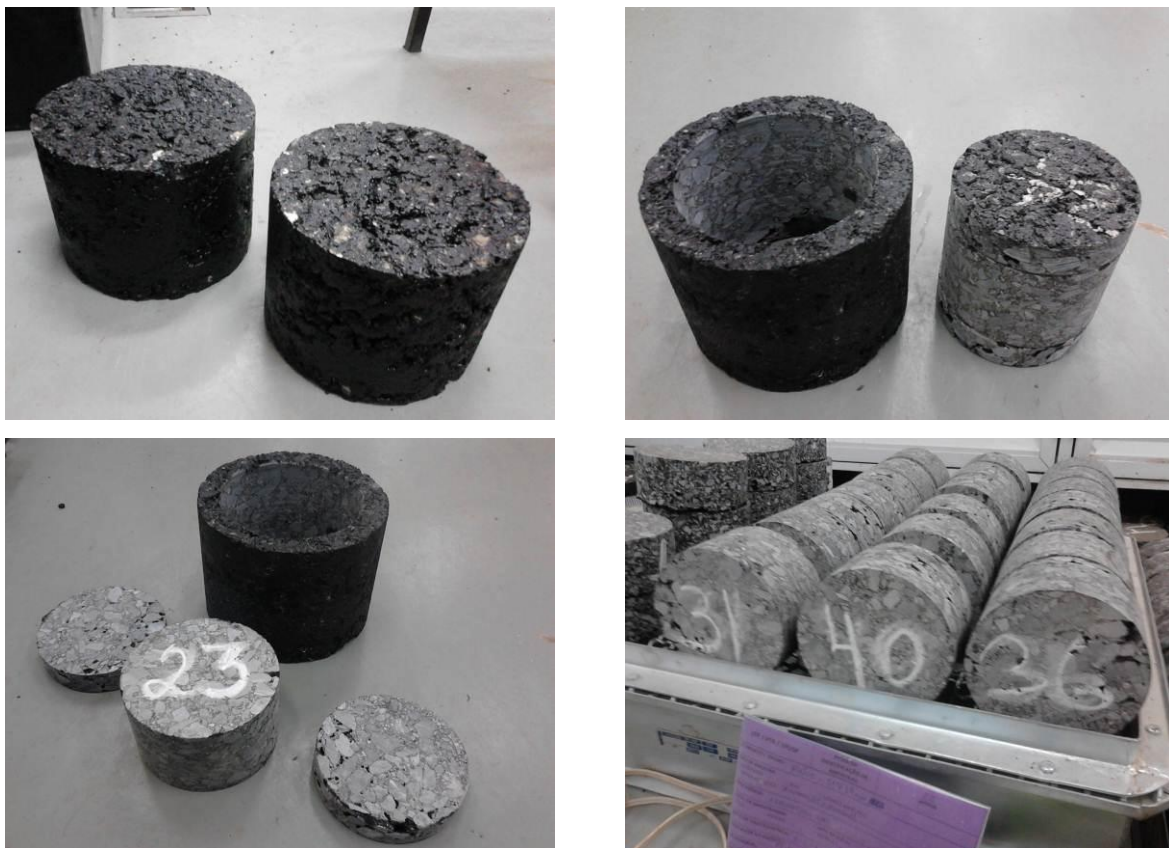


Figura 74. Etapas da preparação dos corpos de prova para os ensaios mecânicos

8.2.1 Parâmetros Volumétricos

Os corpos de prova após broqueados e serrados tendem a ser mais homogêneos, visto que apenas a parte central do mesmo será avaliada mecanicamente. Um contraponto a essa vantagem é a redução do volume de vazios dos CPs, com relação ao volume de vazios do projeto da mistura. É conhecido da literatura, que as bordas do corpo de prova moldados em laboratório (sejam através do compactador Marshall, seja pelo compactador giratório Superpave) apresentam uma maior concentração dos vazios nas superfícies da amostra, conhecido como 'efeito de borda'. A **Figura 75** apresenta um comparativo do volume de vazios dos CPs Superpave (150 x 115mm) com os CPs broqueados (100mm x 63,5mm), onde é possível visualizar sua redução em todas as amostras. As amostras de SAMI não apresentaram variação devido a estas não terem passado pelo processo de broqueamento (já moldadas com 100mm de diâmetro, conforme projeto da mistura). Como será observado a seguir, a redução do volume de vazios da amostra reflete de forma direta nos parâmetros mecânicos avaliados.

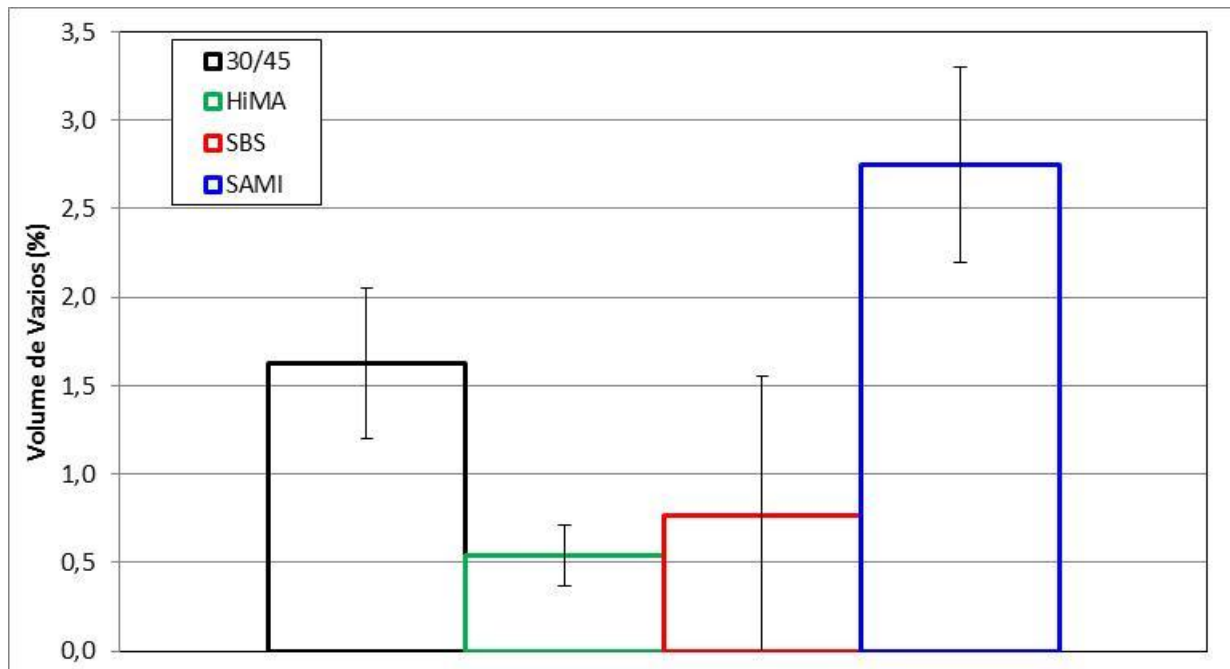


Figura 75. Variação do volume de vazios com o tamanho do corpo de prova

8.2.2 Módulo de Resiliência

Conceitualmente, o módulo de resiliência (MR) vem sendo considerado como o módulo elástico que, juntamente com o coeficiente de Poisson, é o parâmetro que representa o comportamento dos materiais quando usada a teoria da elasticidade. É de conhecimento da comunidade acadêmica, que a maioria dos materiais utilizados na pavimentação não são elásticos, contudo, segundo HUANG (1993), se a carga aplicada é pequena quando comparada à resistência do material e é repetida por um número elevado de vezes (geralmente, acima de 200), a deformação sofrida pelo material é quase completamente recuperável e pode ser considerada como elástica. A maior parte da deformação permanente sofrida pela amostra ocorre no estágio inicial de aplicação de carga, e com o aumento do número de repetições essa deformação permanente diminui.

Os resultados obtidos para as quatro misturas analisadas encontram-se resumidos na **Figura 76**. Os valores apresentados são a média aritmética de três a cinco CPs, a depender da mistura e da variação observada entre os mesmos. O SAMI apresentou o menor valor de módulo, como esperado, pois além de ter o maior volume de vazios entre as misturas após o broqueamento, não possui agregados graúdos em sua matriz pétrea. A mistura com o CAP 30/45, porém, apresentou valores muito superiores ao esperado, fato que não deve ter sido causado apenas pelo baixo valor de VV. Um aquecimento da mistura acima de temperatura de usinagem pode ter sido um fator que tenha causado esse aumento de rigidez, mas optou-se por manter a mistura visto que esta não era uma mistura do trecho experimental, além de o calendário já não permitir a remoldagem de todos os 25 corpos de prova.

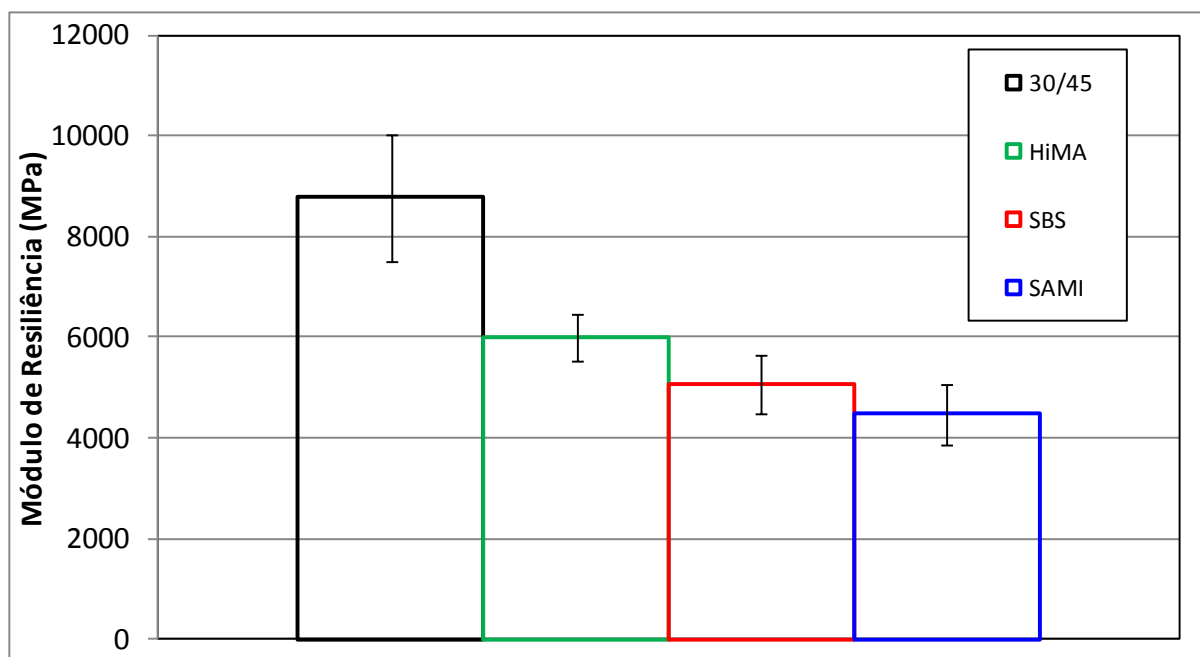
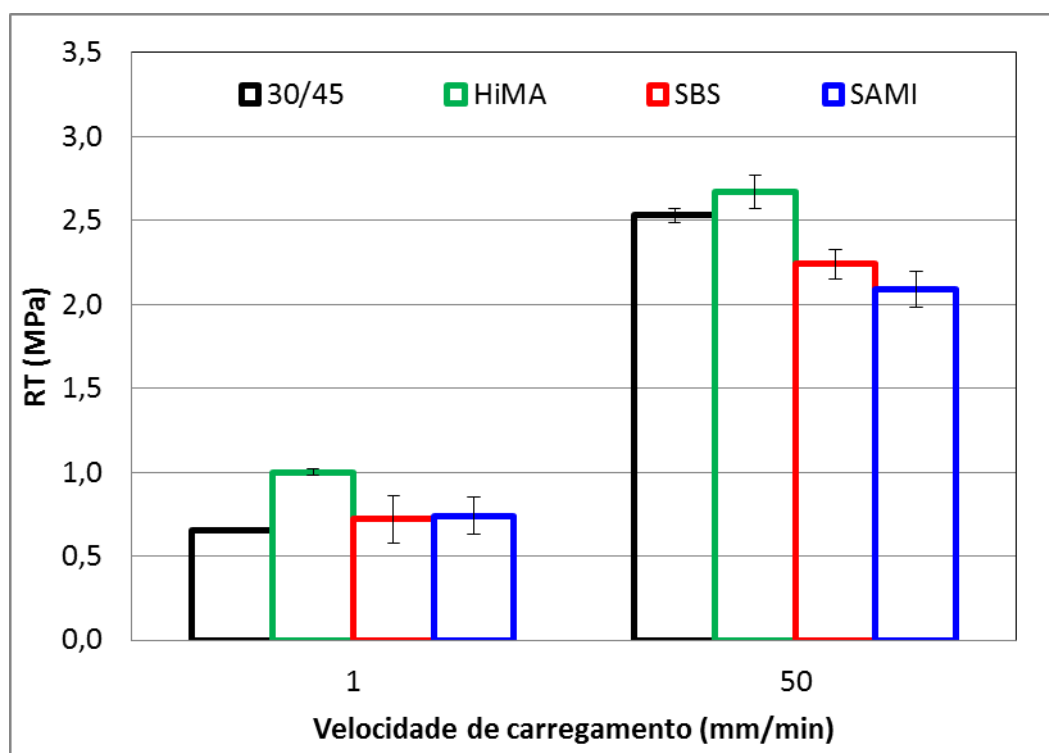


Figura 76. Módulo de resiliência

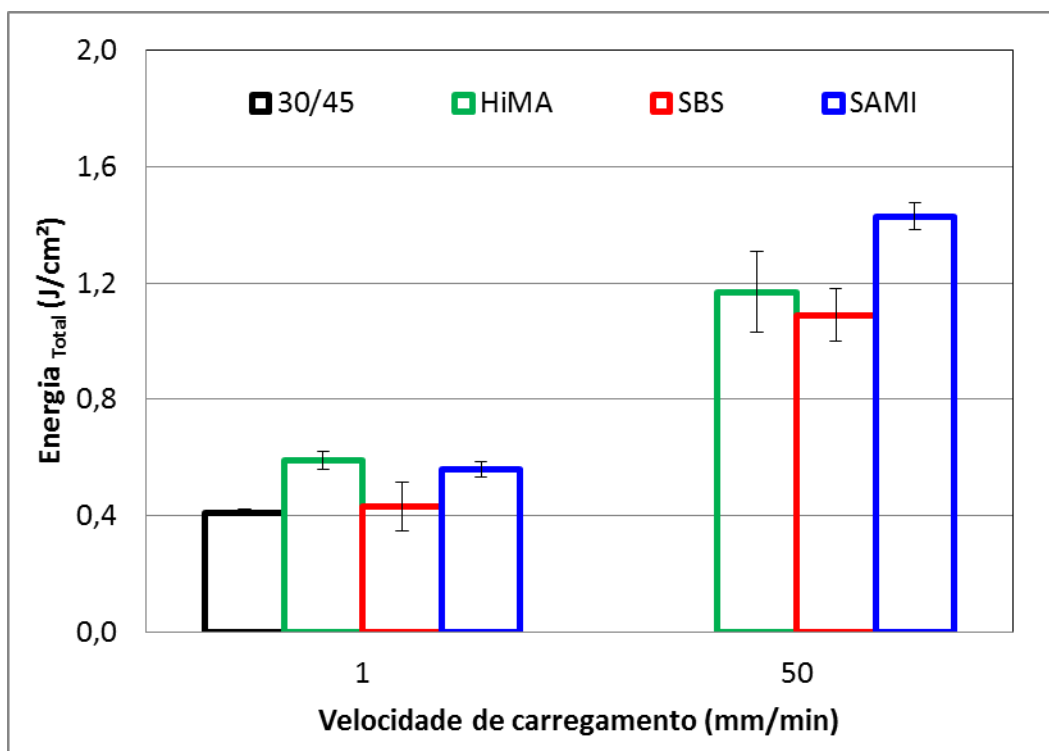
8.2.3 Resistência à Tração por Compressão Diametral – Energia Dissipada

Os ensaios de resistência à tração foram realizados em duas velocidades de carregamento: (i) 50mm/min (valor estabelecido em norma), e (ii) 1mm/min. Essa variação da norma vem sendo adotada nesse projeto de pesquisa (conforme abordados nos relatórios parciais anteriores), visto que na velocidade de ensaio padrão muitas vezes não é possível diferenciar ligantes asfálticos modificados, de ligantes asfálticos puros, especialmente no que tange ao formato da curva de carga versus deslocamento. Dos 25 corpos de prova moldados para cada mistura, 5 foram selecionados para os ensaios de resistência à tração, sendo dois na velocidade padrão, e três na velocidade modificada. A **Figura 77a** apresenta os resultados de RT obtidos nas duas velocidades, e as **Figuras 77b** e **77c** apresentam a energia total dissipada e a energia dissipada até o ponto de carga máxima, respectivamente (ambas divididas pela seção transversal da amostra). Observa-se da **Figura 77** que:

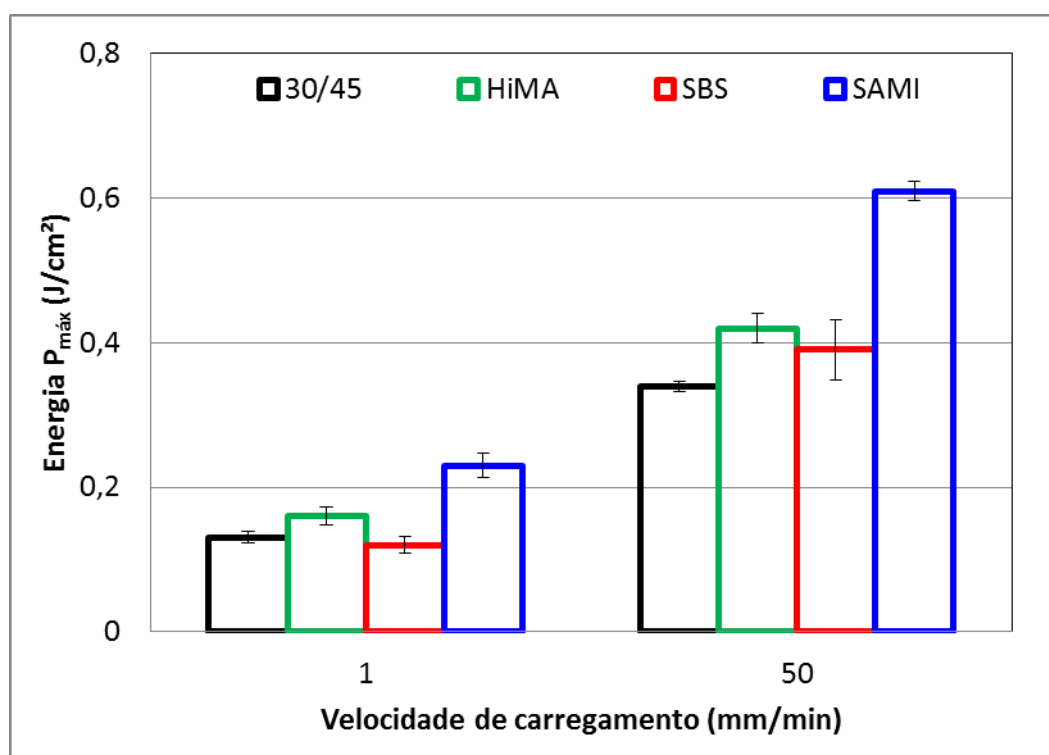
- O parâmetro resistência à tração apresentou pouca variação entre as quatro misturas, em ambas as velocidades de ensaio;
- Os parâmetros de energia, porém, apontaram para um melhor comportamento das misturas preparadas com o ligante altamente modificado (HiMA).



(a)



(b)



(c)

Figura 77. (a) Resistência à tração por compressão diametral, (b) energia total e (c) energia até a carga máxima

A Figura 78 mostra um exemplo dos dados obtidos durante cada um dos ensaios. A diferença de comportamento em cada uma das velocidades está diretamente ligada ao

comportamento viscoelástico do ligante asfáltico. No carregamento de 50mm/min, a resposta viscosa (ou defasada) do corpo de prova não é tão bem capturada como no ensaio a 1mm/min. Em termos gerais, o corpo de prova não tem tempo de responder ao carregamento monotônico que é imposto sobre ele, ficando seu comportamento muito mais próximo do comportamento de uma amostra elástica.

A escolha de qual ensaio é o mais apropriado esta vinculada a velocidade da via onde a mistura asfáltica seria aplicada, o que passa a ser um ponto de dificuldade, uma vez que a mesma mistura pode ser utilizada em distintas localidades. Para efeito referencial, o ensaio deve ser realizado a 50mm/min (segundo o método de ensaio padrão – DNIT/AASHTO/ASTM), a fim de permitir um comparativo. Nesse projeto de pesquisa, porém, o ensaio foi também realizado a 1mm/min para melhor caracterização das misturas com o asfalto altamente modificado (HiMA).

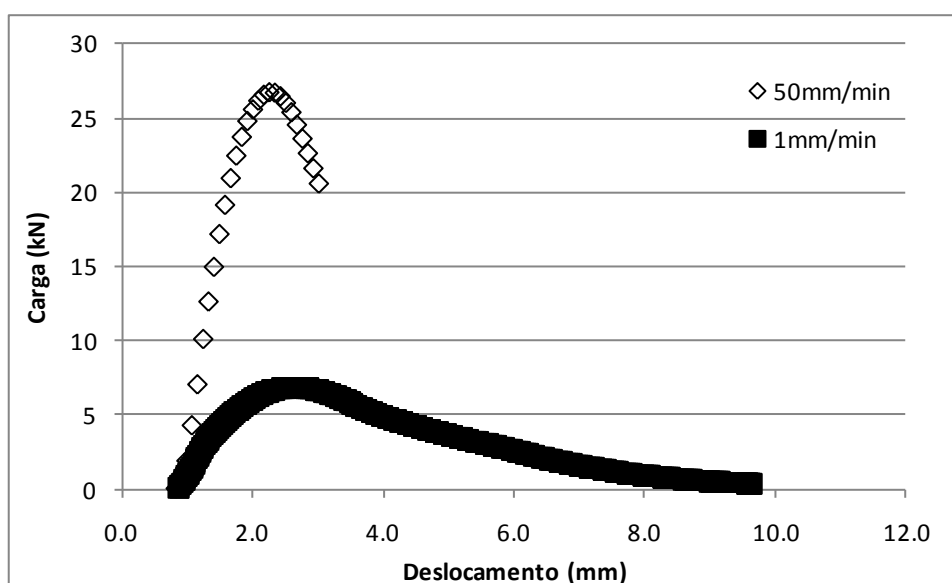


Figura 78. Ilustração dos dados obtidos com carregamento de 50mm/min e 1mm/min

8.2.4 Ensaio de Fratura em Amostras Semi-Circulares – Energia dissipada

O ensaio de flexão de três pontos em amostra semi-circular com fenda, ilustrado na **Figura 79**, vem sendo reconhecido como um ensaio apropriado para realizar testes de fratura no modo I, modo II e modos I/II em amostras frágeis (AYATOLLAHI e ALIHA 2006; LIM et al. 1993). O tipo de fratura irá depender do ângulo que a fenda faz com a vertical (α), porém para α igual a zero, a fratura sempre ocorrerá no modo I (caso abordado nesse trabalho).

Lim *et al.* (1993) observaram em simulações numéricas que o modo de fratura II passa a ser o modo dominante quando a distância entre os apoios, $2S$ na **Figura 79**, é reduzida, ou quando o ângulo e comprimento da trinca são aumentados.

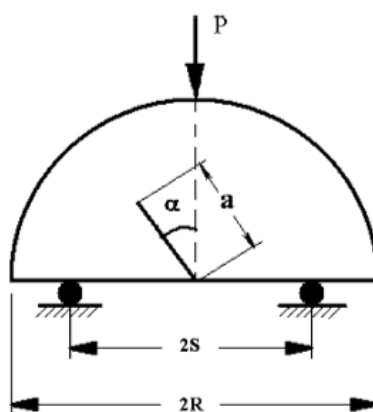


Figura 79. Ilustração da amostra semi-circular

Os testes realizados em amostras semi-circulares de misturas asfálticas podem ser realizados tanto à temperaturas baixas, onde a análise geralmente é feita utilizando ferramentas da mecânica da fratura elástica linear, como à temperaturas mais elevadas. Pesquisas anteriores apontam ainda que os resultados do ensaio de flexão em amostras semi-circulares apresentam boa repetibilidade tanto à baixas temperatura (LI e MARASTEANU, 2009), como em temperaturas mais altas (CHEN et al. 2010), sendo também um ensaio de fácil execução. Molenaar e Molenaar (2000) avaliaram misturas asfálticas com diferentes granulometrias, tipos de ligante, volume de vazios, etc. e observaram que as amostras semi-circulares com fenda produziram resultados com menor variabilidade quando comparados com as amostras sem fenda.

O teste foi realizado sob carregamento monotônico com taxa de deslocamento de $0,005\text{mm/s}$, aplicado no friso localizado na parte superior da amostra, e à temperatura constante (25°C). A taxa de deslocamento foi selecionada baseada em estudos anteriores (Molenaar and Molenaar 2000), onde os autores observaram que parâmetros de fratura eram praticamente independentes do diâmetro do CP, nessa taxa de deslocamento, uma vez que o diâmetro fosse igual ou superior a 150mm . A **Figura 80** ilustra as dimensões da amostra semi-circular, bem como da fenda fabricada.

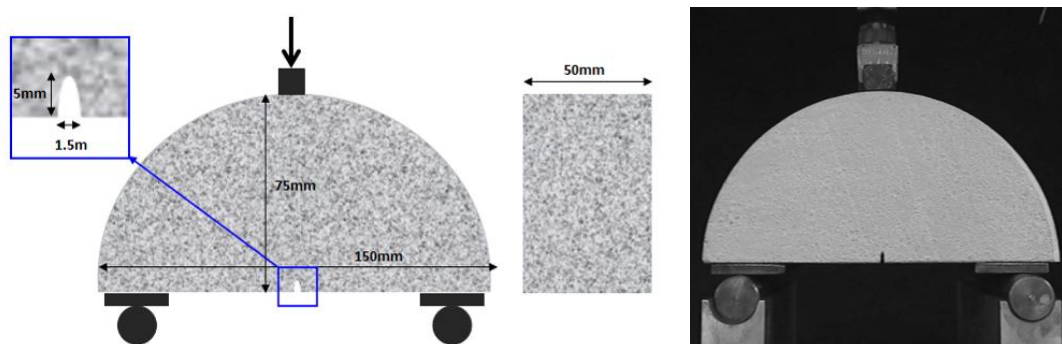


Figura 80. Configuração do ensaio de flexão em amostra semi-circular com fenda (Montestruque et al., 2010)

Os seguintes parâmetros foram quantificados durante o teste de flexão nas amostras semi-circulares: (i) energia total (E_{total}) e (ii) energia até a carga máxima ($E_{Pmáx}$). As energias foram calculadas como a área sob a curva de carga versus deslocamento. A área sob a curva foi dividida pelas dimensões do CP (espessura x ligamento), sendo E_{total} e $E_{Pmáx}$ reportados em J/cm^2 . Os ensaios foram realizados a 15 e 25°C e os resultados encontram-se apresentados na Figura 81.

Observa-se dos resultados apresentados que a ordem de grandeza dos parâmetros de energia no ensaio SCB foram inferiores à ordem de grandeza dos mesmos parâmetros obtidos do ensaio de resistência à tração por compressão diametral, porém o ranqueamento das misturas manteve-se semelhante (SAMI com comportamento superior e HiMA e SBS com comportamento um pouco inferior, mas comparáveis). A diferença na ordem de grandeza deve-se ao fato de a amostra SCB possuir uma pré-trinca e a amostra de RT não. A pré-trinca gera uma concentração de tensão na ponta da mesma, o que faz com que a amostra entre em colapso mais rápido.

Para 'validar' o ranqueamento das misturas, porém, é necessária a realização do ensaio de fadiga (abordado no item a seguir), visto que em campo essas misturas irão passar por um carregamento cíclico/dinâmico com a passagem dos veículos. Cabe salientar que os parâmetros de resistência e fratura continuam sendo importantes pela: (i) rapidez de execução do ensaio (carregamento monotônico), (ii) além de servirem para o controle da mistura após aplicação em campo.

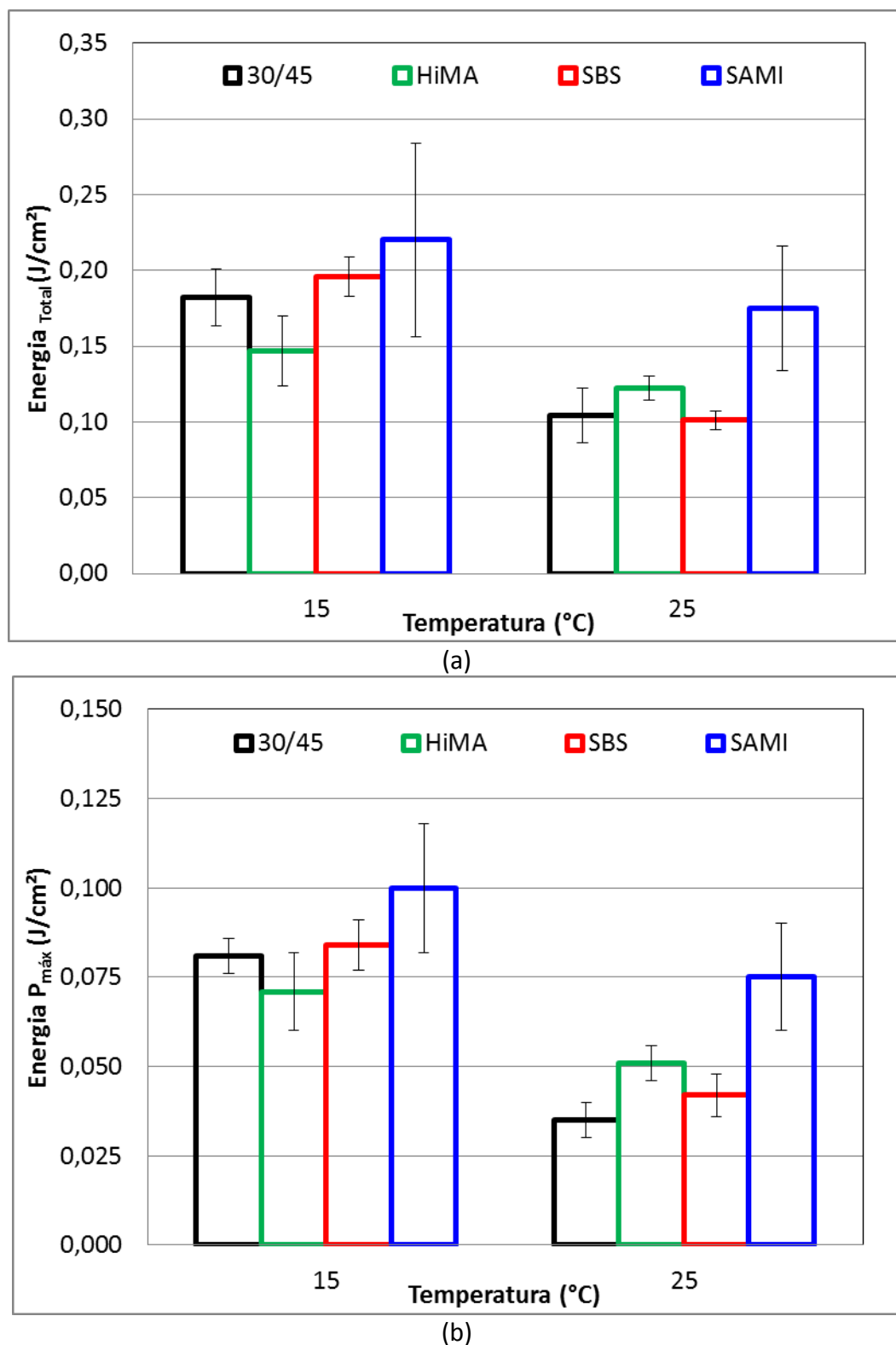


Figura 81. Ensaio de fratura em amostras semi-circulares (a) energia total e (b) energia até a carga máxima

8.2.5 Ensaio de Fadiga por Compressão Diametral (Tensão Controlada)

A fadiga de um material é um processo de deterioração estrutural quando este é submetido a um estado de tensões e deformações repetidas. A carga aplicada na amostra pode ser

muito menor que a carga de ruptura do mesmo, resultando em trincas após um número elevado de repetições do carregamento.

O ensaio de fadiga por tração indireta (compressão diametral) pode ser realizado à tensão ou à deformação controlada, além de um “ensaio intermediário”, conforme abordado por LOUREIRO (2003). No ensaio à tensão controlada (TC), a carga aplicada é mantida constante e as deformações resultantes aumentam no decorrer do ensaio. O ensaio de deformação controlada (DC) envolve a aplicação de cargas repetidas que produzam uma deformação constante ao longo do ensaio, o que leva a uma diminuição da carga aplicada, a fim de manter a deformação constante. Neste último (DC) precisa-se ainda estabelecer um critério de ruptura específico, visto que o ensaio é caracterizado por um decréscimo na carga solicitante e, portanto, não existe de forma clara um momento de ruína completa do CP. Adota-se, em geral, a definição de fadiga quando a carga é reduzida à metade da inicialmente aplicada para produzir o mesmo deslocamento.

No Brasil, a prática comum é a utilização do ensaio de fadiga à tensão controlada, que não necessita da utilização de LVDT, nem do suporte para fixação do mesmo. MONISMITH (1958) foi um dos primeiros autores a definir a vida de fadiga como sendo o número total de aplicações de carga necessário à fratura completa da amostra. A carga aplicada é fixada por corpo-de-prova testado, e deve induzir a tensões normais horizontais da ordem de 10 a 50% do valor de ruptura (RT), segundo Medina (1997). Este ensaio tem como objetivo simular a passagem da roda dos veículos sobre o revestimento dos pavimentos.

A vida de fadiga à tensão controlada pode ser expressa pelas equações descritas nas equações eq (1) e eq (2).

$$N = k_1 \left(\frac{1}{\sigma_t} \right)^{n_1} \quad \text{eq.(1)}$$

$$N = k_2 \left(\frac{1}{\Delta\sigma} \right)^{n_2} \quad \text{eq.(2)}$$

em que,

N: vida de fadiga;

σ_t : tensão de tração;

$\Delta\sigma$: diferença entre as tensões de compressão e de tração no centro da amostra;

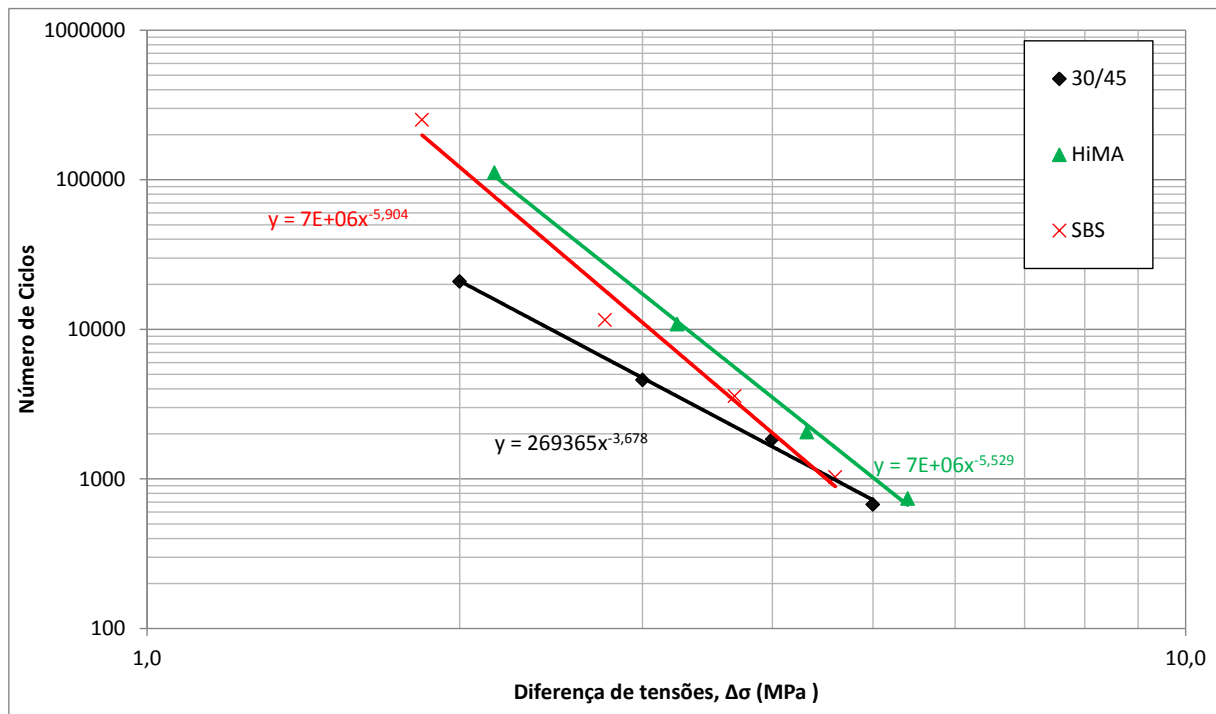
k_1 , k_2 , n_1 e n_2 : constantes determinadas a partir de resultados experimentais.

Para o presente trabalho, adotou-se o seguinte procedimento de ensaio:

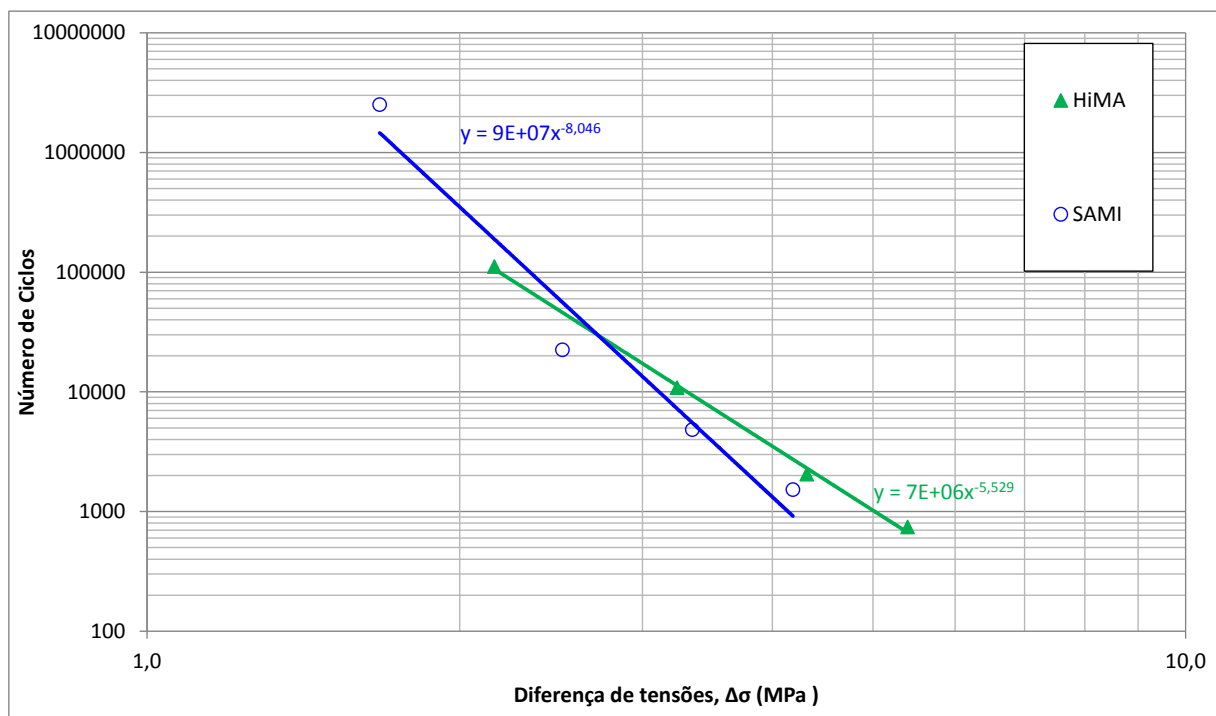
- posicionar o CP na base da prensa, apoiando o mesmo no friso inferior;
- assentar o pistão de carga com o friso superior em contato com o CP diametralmente oposto ao friso inferior;
- aplicar uma carga que induza a tensões de tração horizontais aproximadamente entre 10 e 50% do valor de RT previamente determinada; e
- aplicar cargas com frequência de 1Hz com tempo de carregamento de 0,1s e 0,9s de descarregamento.

Foram realizados ensaios com quatro (20, 30, 40 e 50% de RT) níveis de tensão, totalizando, em média, 250 horas de ensaio por mistura. Para cada nível de tensão foram ensaiados três corpos de prova. O nível de tensão aqui referido diz respeito à tensão de tração no centro do CP não danificado submetido à compressão diametral. A carga no CP é ajustada de forma a produzir o nível de tensão desejado. A **Figura 82** apresenta as curvas de fadiga obtidas para as quatro misturas asfálticas avaliadas, e a **Tabela 11** apresenta os coeficientes de cada curva de regressão.

Observa-se do gráfico que o comportamento do SAMI foi bem superior ao das demais misturas, sendo mais evidenciado para menores níveis de tensão (mais compatíveis com os níveis de carregamento originados em campo). Das quatro misturas, a SPV19mm com o CAP30/45 apresentou o pior comportamento (o que pode ter sido também ocasionado por um possível superaquecimento da mistura na fase de preparação das amostras). Vale salientar que além das diferenças entre as misturas em termos de materiais asfálticos e granulometria, existe ainda a variável ‘volume de vazios’.



(a)



(b)

Figura 82. Vida de fadiga (a) misturas SPV 12,5mm (diferentes ligantes) e (b) misturas preparadas com o ligante altamente modificado

Tabela 11. Coeficientes da equação de fadiga

Mistura	Parâmetros		Coeficiente de determinação (R ²)
	k	n	
SPV19mm 30/45	235,195	3.59	0.96
SPV19mm HiMA	6,905,754	5.82	0.98
SPV19mm SBS	6,254,311	5.49	0.96
SAMI	36,611,600	6.18	0.90

9 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente projeto constou da avaliação de um grande número de misturas asfálticas, bem como da execução de ensaios laboratoriais e de campo. O projeto da mistura asfáltica anti-reflexão de trincas (SAMI) trouxe uma série de reflexões sobre a função desse tipo de mistura na estrutura do pavimento e as características julgadas importantes para o seu bom desempenho em campo. Diante dos resultados obtidos ao longo dos dois anos de execução desse projeto e apresentados nos **itens 5 a 8** deste relatório, pode-se concluir:

Item 5 – Avaliação das Misturas Asfálticas da Parte 1 do Projeto

- Não foi observada uma tendência linear nos resultados de resistência à tração, bem como nos resultados de energia dissipada, com a variação de temperatura. Observou-se, porém que para temperaturas de ensaio mais baixas, existe uma maior propensão de quebra dos agregados durante o rompimento da amostra. Acredita-se que a principal razão para tal, é o fato de a mistura apresentar comportamento mais próximo do regime elástico para temperaturas baixas, enquanto que para as temperaturas mais elevadas, a parcela viscosa do ligante asfáltico passa a exercer papel de maior importância. Dessa forma, a energia medida nos ensaios a temperaturas mais altas, reflete não somente o dano causado devido à ruptura do material, mas também devido a uma parcela de deformação permanente.

Item 6 – Camada Asfáltica Intermediária Anti-Reflexão de Trincas (SAMI)

- O uso de 75 giros na dosagem das misturas levou a um menor teor de ligante asfáltico para uma mesma condição de volume de vazios quando comparado à dosagem com 50 giros (como já era esperado). Isso consequentemente acarretou em maiores valores de módulo de resiliência, ou rigidez, o que pode vir a ser uma desvantagem visto que o

objetivo é produzir uma mistura asfáltica flexível, que não terá funções estruturais no sistema de camadas do pavimento. Dessa forma, a dosagem do SAMI para execução no trecho experimental foi realizada adotando 50 giros no compactador giratório Superpave.

- Os parâmetros de densificação (CDI, TDIm e TDI) não apresentaram diferenças significativas entre as dosagens 1 e 2. Para teores com volume de vazios em torno de 1,0-1,5%, ambas apresentam boa trabalhabilidade (CDI baixo), porém uma propensão elevada à deformação permanente (TDIm e TDI baixos). Os valores de TDIm e TDI baixos foram provavelmente causados pela combinação de uma estrutura pétreia sem agregados graúdos, além do percentual mais elevado de ligante asfáltico. Essa, porém, não deve ser uma preocupação, visto que o SAMI não tem papel estrutural. Com relação aos resultados de energia dissipada obtidos do ensaio de resistência à tração por compressão diametral modificado, observou-se pouca variação com o teor de ligante, porém as curvas de carga x deslocamento foram bastante distintas.
- Na comparação entre as dosagens 1 e 3 de dosagem (avaliando-se o efeito do fracionamento peneira a peneira), observou-se que houve uma considerável variação tanto dos parâmetros volumétricos, como dos parâmetros mecânicos. Esse fato é um indicativo de que a produção de uma massa asfáltica tipo SAMI pode apresentar variação do projeto, levando a mudanças nas propriedades inicialmente previstas.
- Na comparação entre as dosagens 2 e 4 de dosagem (avaliando-se o efeito da forma de compactação – 75 giros versus 75 golpes), não foi observada uma grande variação nos parâmetros volumétricos das duas dosagens. Os valores de módulo de resiliência e as energias calculadas através do ensaio de resistência à tração modificado, porém, foram superiores para os CPs moldados através do compactador giratório (Dosagem 2).
- Na comparação entre as dosagens, 5, 6 e 7 (avaliando-se o efeito do tipo de ligante), observou-se uma diferença considerável entre o ligante convencional (dosagem 5) e os ligantes modificados (dosagens 6 e 7). O único ensaio destrutivo realizado foi o de resistência à tração por compressão diametral modificado, a fim de determinar a energia dissipada durante o ensaio. Esse por ser um ensaio monotônico, talvez não tenha sido capaz de quantificar a maior capacidade de recuperação do ligante c, em relação ao ligante B.

- Parte dos parâmetros de densificação não puderam ser determinados, principalmente para os teores mais baixos de asfalto. O CDI, que é um indicativo da trabalhabilidade das misturas, parece não ser um parâmetro importante para misturas tipo SAMI, visto que essas, por serem misturas finas e com alto teor de ligante, não apresentariam esse tipo de problema.

Item 7 – Trecho Experimental

Diante das dosagens da mistura asfáltica usada como camada intermediária anti-reflexão de trincas, e da execução dos trechos experimentais na Autopista Régis Bittencourt observou-se:

- A quantidade superior de ligante exigida a esse tipo de mistura não ocasionou dificuldades para a produção da massa e lançamento em pista.
- A dosagem com 50 giros foi adequada às condições de compactação da massa asfáltica em campo.
- Observou-se uma considerável variação tanto dos parâmetros volumétricos, como dos parâmetros mecânicos, quando a granulometria do SAMI não foi controlada peneira a peneira durante a dosagem da mistura (para tentar simular possíveis variações em campo). Os dados de granulometria após a extração realmente indicaram uma maior variação do SAMI (composto apenas por pó de pedra) com relação à granulometria de projeto.
- Os levantamentos defletoométricos realizados com a Viga Benkelman mostram deflexões no mesmo patamar das observadas no levantamento logo após a obra.
- Novo levantamento ao longo dos anos deverá mostrar a evolução do comportamento do SAMI e de camadas de revestimentos com ou sem o SAMI.

Média das deflexões máximas para a Faixa I

Segmento	Viga Benkelman								FWD	
	Antes da Intervenção		Após a Obra		Após 3 meses		Após 6 meses		Após 3 meses	
	Mar-12		Mar-12		Jul-12		Out-12		Jul-12	
	Média	D.P.	Média	D.P.	Média	D.P.	Média	D.P.	Média	D.P.
I.1	52.7	-	68.0	-	70.0	-	64.0	5.7	55.1	1.4
I.2	65.9	14.2	58.5	12.9	63.5	15.4	60.9	10.6	54.7	6.2
I.3	58.0	6.6	47.7	11.0	58.5	13.1	68.5	14.7	57.7	6.7
I.4	68.2	10.6	67.0	8.2	74.9	10.6	67.5	12.4	56.6	6.3
I.5	78.0	4.3	78.0	5.7	72.0	2.8	58.0	11.7	55.0	3.9
I.6	82.4	6.2	82.7	12.2	93.0	1.4	56.7	7.3	52.1	2.9

Média das deflexões máximas para a Faixa II

Segmento	Viga Benkelman								FWD	
	Antes da Intervenção		Após a Obra		Após 3 meses		Após 6 meses		Após 3 meses	
	Mar-12		Mar-12		Jul-12		Out-12		Jul-12	
	Média	D.P.	Média	D.P.	Média	D.P.	Média	D.P.	Média	D.P.
I.1	50.3	4.4	81.6	8.6	60.0	3.9	66.2	7.4	55.4	6.1
I.2	55.4	13.1	68.9	15.7	64.2	8.3	56.2	7.5	51.1	5.1
I.3	67.6	10.7	83.3	7.8	70.1	7.5	57.6	11.9	59.5	8.3
I.4	74.2	5.5	84.8	13.5	79.0	9.2	66.4	6.2	61.3	5.2

- Os corpos de prova extraídos de pista apresentaram volumes de vazios superiores ao esperado, apesar do não comprometimento até o presente momento da integridade das misturas asfálticas em campo. Esse maior valor de volume de vazios foi o possível responsável pela queda nos valores de MR e RTm das amostras de CBUQ.
- Os resultados da retroanálise apontaram valores de módulo da mistura SPV19mm SBS da ordem de 3000MPa, da mistura SPV19mm HiMA em torno de 2600MPa, e do SAMI da ordem de 1800MPa. Os valores das misturas SPV19mm estão de acordo com os ensaios de laboratório realizados em corpos de prova extraídos de pista após a execução do trecho experimental. Os resultados de SAMI não puderam ser confrontados, pois devido a pouca espessura da camada em campo (em torno de 2 cm), os corpos de prova extraídos não puderam ser ensaiados.

Item 8 – Avaliação Laboratorial das Misturas Aplicadas no Trecho Experimental

- Os ensaios reológicos nos dois ligantes asfálticos usados nos trechos experimentais mostraram uma clara diferença de comportamento, onde o ligante altamente modificado (HiMA) apresentou melhores propriedades, principalmente à altas

temperaturas. Essas melhores propriedades viscoelásticas em temperaturas elevadas, estão associados a um melhor comportamento com relação à deformação permanente.

- Para os corpos de prova fabricados em laboratório, observou-se uma grande sensibilidade dos parâmetros mecânicos ao volume de vazios. O broqueamento da parte central dos corpos de prova Superpave de 6", levaram a um volume de vazios de mais ou menos a metade do obtido na fase de projeto, acarretando em valores bem elevados de MR e RT.
- O parâmetro resistência à tração apresentou pouca variação entre as quatro misturas, em ambas as velocidades de ensaio, porém, os parâmetros de energia apontaram para um melhor comportamento das misturas preparadas com o ligante altamente modificado (HiMA).
- A ordem de grandeza dos parâmetros de energia no ensaio de fratura com amostras semi-circulares foram inferiores à ordem de grandeza dos mesmos parâmetros obtidos do ensaio de resistência à tração por compressão diametral, porém o ranqueamento das misturas manteve-se semelhante (SAMI com comportamento superior e HiMA e SBS com comportamento um pouco inferior, mas comparáveis).
- O ensaio de fadiga mostrou comportamento bem superior do SAMI comparado com o comportamento das demais misturas, sendo mais evidenciado para menores níveis de tensão, conforme observado nos resultados de energia dissipada no ensaio de RT e de fratura. Dessa forma, acredita-se que a determinação do parâmetro 'energia dissipada' pode auxiliar no ranqueamento das misturas asfálticas na fase de projeto, uma vez que o ensaio de fadiga, além de exigir grande quantidade de amostras, demanda um elevado número de horas para obtenção da curva para quatro níveis de tensão.

10 ENTIDADE E EQUIPE EXECUTORA

A empresa que coordena os serviços é a PAULISTA INFRAESTRUTURA LTDA, associada com:

- Laboratório de Tecnologia de Pavimentação do Departamento de Engenharia de Transportes da Escola Politécnica da USP, e
- JMCHAVES Consultoria Ltda.
 - Coordenador Geral: José Mário Chaves - JMChaves
 - Equipe LTP/EPUSP:

- Profa. Dra. Liedi Légi Bariani Bernucci – Professora Titular, Coordenadora do Projeto
- Kamilla L. Vasconcelos – Pós-Doutora, Pesquisadora
- Edson de Moura – Doutor, Técnico Nível Superior
- Rodrigo Leandro – Doutorando, Pesquisador
- Iuri Sidney – Doutorando, Pesquisador
- Kendi Sanbonsuge – Mestre, Técnico Nível Superior
- Matheus Gaspar – Iniciação Científica
- Erasmo Alves – Técnico de Laboratório
- Diomária Rocha dos Santos – Secretária
- Equipe Laboratório da Paulista Infraestrutura:
 - Amanda Helena Marcandali Silva – Doutoranda, Pesquisadora
 - Vagner Alba – Tecnólogo

11 REFERÊNCIAS

AYATOLLAHI, M. R., e ALIHA, M. R. M. (2006). On determination of mode II fracture toughness using semi-circular bend specimen. *International Journal of Solids and Structures*, 43(17), 5217-5227

BAHIA, H. U.; FRIEMEL, P. P. e RUSSEL, J. (1998) Optimization of constructability and resistance to traffic: a new design approach for HMA using the Superpave gyratory compactor. *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, v. 67, p. 189–232.

BENNERT, T. e MAHER, A. (2008) Field and Laboratory Evaluation of a Reflective Crack Interlayer in New Jersey. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* 2084, pp. 114-123.

BENNERT, T.; WORDEN, M. e TURO, M. (2009) Field and Laboratory Forensic Analysis of Reflective Cracking on Massachusetts Interstate 495. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* 2126, 27–38.

BLANKENSHIP, P.; IKER, N.; DRHOHLAV, J. (2004) Interlayer and Design Considerations to Retard Reflective Cracking. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, No. 1896, TRB, National Research Council, Washington, D.C., pp. 177–186.

CHEN, X., Li, H., e QIAN, Z. (2010). Fracture properties of epoxy asphalt mixture. *Key Engineering Materials*, 417-418(Advances in Fracture and Damage Mechanics VIII), 917-920

D'ANGELO, J. e DONGRÉ, R. (2009) Practical use of Multiple Stress Creep and Recovery Test: Characterization of Styrene-Butadiene-Styrene Dispersion and Other Additives in Polymer-Modified Asphalt Binders. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, No. 2126, TRB, National Research Council, Washington, D.C., pp. 73–82.

DAVE, E.V.; AHMED, S.; BUTTLAR, W.G.; BAUSANO, J.P. e LYNN, T. (2010) Investigation of strain tolerant mixture reflective cracking relief system: an integrated approach. *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, v.79, p.119-156.

HUANG, Y.H. (1993) *Pavement Analysis and Design*. Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, USA.

LI, X.-J., e MARASTEANU, M. O. (2009). Using semi circular bending test to evaluate low temperature fracture resistance for asphalt concrete. *Experimental Mechanics*.

LIM, I. L., JOHNSTON, I. W., e CHOI, S. K. (1993). Stress intensity factors for semi-circular specimens under three-point bending. *Engineering Fracture Mechanics*, 44(3), 363-382

LOPES, M.M; LINHARES, M.; VASCONCELOS, K.L.; BERNUCCI, L.L.B. e CHAVES, J.M. (2011) Estudo do Processo de Densificação e da Deformação Permanente de Misturas Asfálticas. In: XXV Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, Belo Horizonte.

LOUREIRO, T.G. (2003) Estudo da evolução do dano por fadiga em misturas asfálticas. Tese de M. Sc., PETRAN/DET/UFC, Fortaleza, CE.

MAHMOUD, A. F. F.; BAHIA, H. (2004) Using the Gyratory Compactor to Measure Mechanical Stability of Asphalt Mixtures, Wisconsin Highway Research Program. Projeto Número 0092-01-02.

MAKOWSKI, L., BISCHOFF, D.L., BLANKENSHIP, P., SOBCZAK, D. e HAULTER, F. (2005) *Wisconsin experiences with reflective crack relief projects*. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, No. 1905, pp. 44–55.

MEDINA, J. (1997) *Mecânica dos Pavimentos*. 1ª ed., Rio de Janeiro, Editora UFRJ.

MOLENAAR, J. M. M., e MOLENAAR, A. A. A. (2000). Fracture toughness of asphalt in the semi-circular bend test. 2nd Euroasphalt and Eurobitumen Congress, Barcelona, 509-517

MONISMITH, C.L. (1958) Flexibility Characteristics of Asphaltic Paving Mixtures.

Proceedings Association of Asphalt Paving Technologists. Vol. 27.

MONESTRUQUE, G., VASCONCELOS, K. L., BERNUCCI, L. B. (2010) Ensaio de Flexão em Amostra Semi-Circular com Fenda e Análise de Imagens para Caracterização da Resistência à Fratura de Misturas Tipo AAUQ In: XXIV Congresso Nacional de Pesquisa e Ensino em Transportes, Salvador.

NASCIMENTO, L.A.H. (2008) Nova Abordagem da Dosagem de Misturas Asfálticas Densas com Uso do Compactador Giratório e Foco na Deformação Permanente. Dissertação de Mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ.

SHIMAZAKI, M. K., TAKAHASHI, M., KASAHARA, A. (2010) Development of High Performance Asphalt for Prevention of Reflective Cracking. Compendium of Papers from the First International Conference on Pavement Preservation, Chapter 4: Paper 71, pp. 227-244.

ANEXO A

(Dados Energia – Misturas Asfálticas Parte 1)

Mistura B

Tabela 12. Resultados obtidos para a mistura B (granulometria SPV 12,5mm e CAP 30/45)

Mistura	Temp (°C)	RT (MPa)	P _{max} (kN)	d @ P _{max} (mm)	Energia _{total} (N.m)	Energia _{Pmax} (N.m)
(B)	5		51.10	1.59	59.82	41.28
	5	5.52	54.76	1.73		38.37
	5	4.50	44.85	1.84	59.37	40.80
	5	5.10	51.13	1.67	67.86	39.91
	15	3.24	32.50	1.68	58.53	29.22
	15	3.08	31.10	2.01	68.79	31.39
	15	3.26	32.90	1.77	61.86	29.66
	15	3.01	30.60	2.02	98.61	33.81
	15	3.26	33.10	1.93	65.34	34.12
	25	1.61	16.15	1.59	55.95	16.98
	25	1.74	17.48	1.60	62.31	18.79
	25		15.91	2.26	63.58	21.41
	25	1.86	17.70	1.93	68.16	19.74
	35	0.69	6.96	1.60	26.74	6.82
	35	0.57	5.77	1.77	22.15	6.27
	35	0.61	6.11	1.52	20.26	5.79
	35	0.69	6.91	1.52	23.38	6.40
	35	0.59	5.90	1.77	26.16	6.63

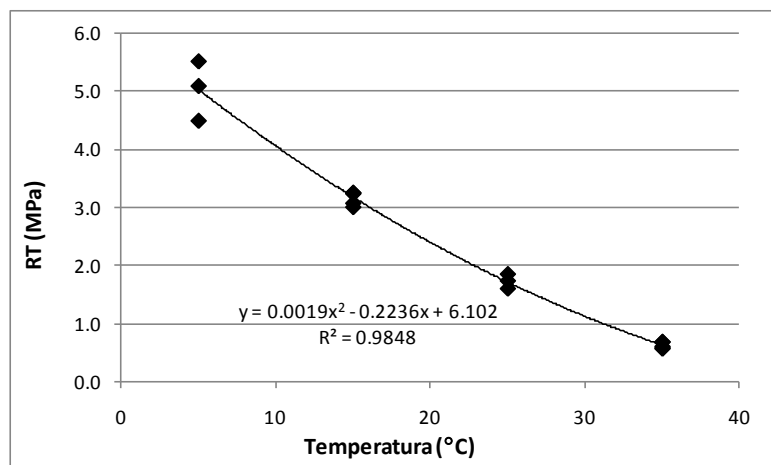


Figura 83. Resultado de RT para a mistura B (granulometria SPV 12,5mm e CAP 30/45)

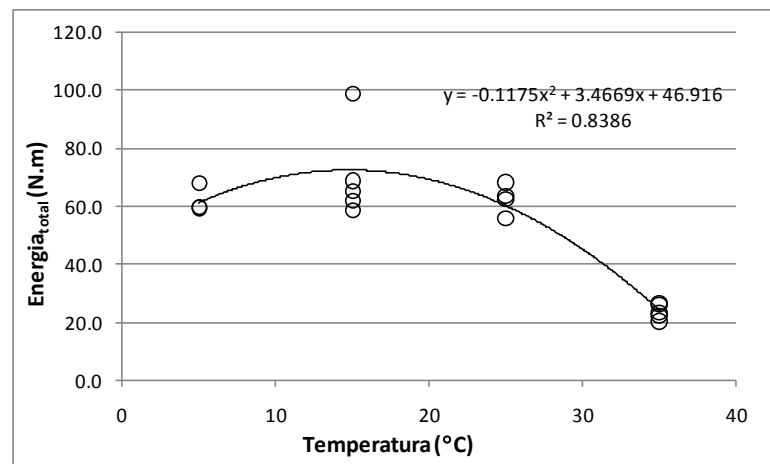


Figura 84. Resultado de energia dissipada total para a mistura B (granulometria SPV 12,5mm e CAP 30/45)

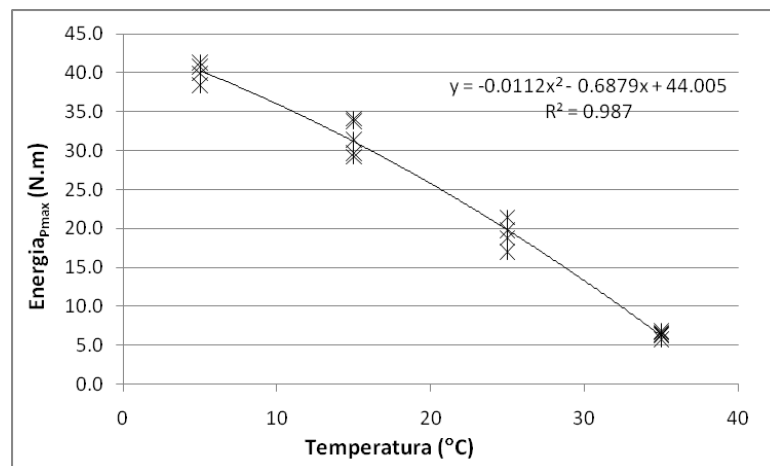


Figura 85. Resultado de energia dissipada até o ponto de carga máxima para a mistura B (granulometria SPV 12,5mm e CAP 30/45)

Mistura D

Tabela 13. Resultados obtidos para a mistura D (granulometria SMA 8S e CAP 30/45)

Mistura	Temp (°C)	RT (MPa)	P _{max} (kN)	d @ P _{max} (mm)	Energia _{total} (N.m)	Energia _{Pmax} (N.m)
(D)	5	3.96	40.40	2.19	67.69	39.22
	5	4.16	42.40	1.76	67.49	33.76
	5	4.12	42.10	1.52	73.01	31.67
	5	3.89	39.70	1.76	93.60	36.37
	5	3.96	40.40	1.68	53.32	31.51
	15	3.08	31.30	2.52	116.60	41.82
	15	3.41	35.50	2.01	93.62	38.58
	15	3.41	34.70	2.09	104.19	39.51
	15	3.34	34.10	1.93	115.20	39.78
	15	3.27	33.70	2.10	95.87	40.66
	25	1.20	12.10	2.44	75.09	19.47
	25	1.12	11.40	2.27	69.72	17.60
	25	1.34	13.50	2.19	74.84	18.19
	35	0.62	6.41	2.36	33.67	10.65
	35	0.56	5.78	2.19	33.49	8.66
	35	0.55	5.67	1.93	31.48	7.34
	35	0.58	6.02	2.01	34.14	8.18
	35	0.57	5.87	2.27	30.57	8.86

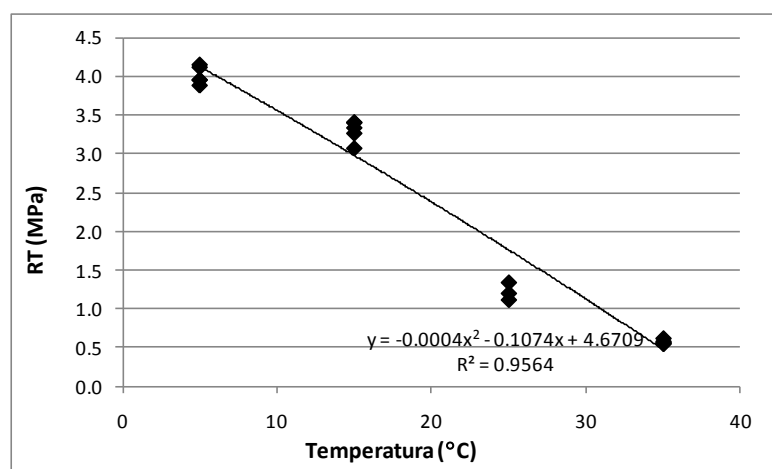


Figura 86. Resultado de RT para a mistura D (granulometria SMA 8S e CAP 30/45)

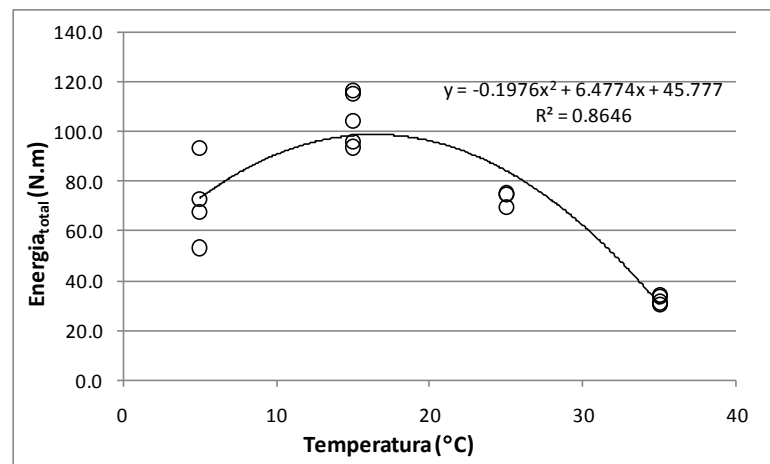


Figura 87. Resultado de energia dissipada total para a mistura D (granulometria SMA 8S e CAP 30/45)

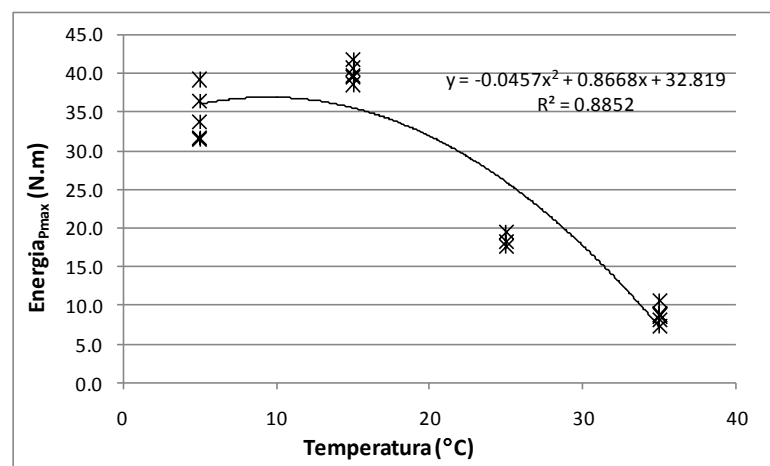


Figura 88. Resultado de energia dissipada até o ponto de carga máxima para a mistura D (granulometria SMA 8S e CAP 30/45)

Mistura E

Tabela 14. Resultados obtidos para a mistura E (granulometria SMA 11S e CAP 30/45)

Mistura	Temp (°C)	RT (MPa)	P _{max} (kN)	d @ P _{max} (mm)	Energia _{total} (N.m)	Energia _{Pmax} (N.m)
(E)	5	3.56	36.40	2.02	83.88	41.91
	5	3.57	36.40	1.69	82.87	30.91
	5	3.91	39.90	1.93	113.33	39.94
	5	3.27	33.40	1.85	75.79	31.21
	5	3.77	38.40	1.85	102.03	35.78
	15	3.22	33.10	1.93	92.33	37.22
	15	3.14	32.40	2.10	104.34	37.71
	15	3.16	32.70	2.01	109.19	36.04
	15	3.04	31.36	2.10	88.24	38.46
	25	1.23	12.39	2.52	75.09	19.17
	25	1.27	12.70	1.93	68.99	16.53
	25	1.14	11.60	1.93	59.10	14.97
	25	1.28	12.90	1.85	85.19	15.86
	35	0.60	6.24	1.77	38.49	6.76
	35	0.61	6.18	2.01	37.12	7.99
	35	0.52	5.32	2.26	37.50	8.25
	35	0.58	5.98	1.85	35.78	6.80
	35	0.56	5.79	1.93	33.12	6.76

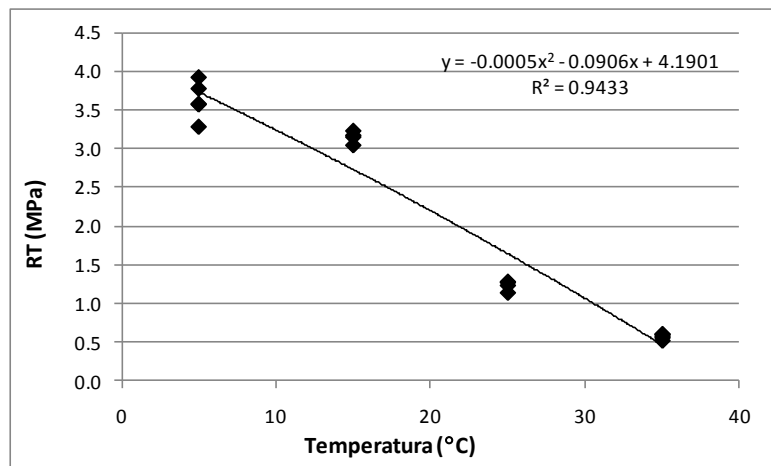


Figura 89. Resultado de RT para a mistura E (granulometria SMA 11S e CAP 30/45)

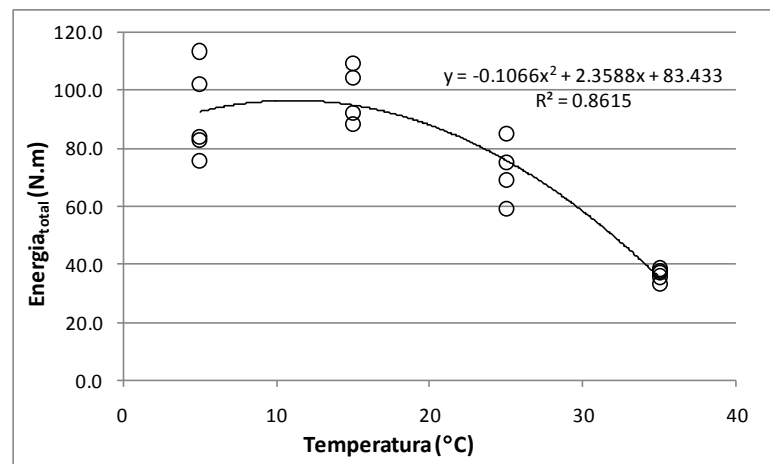


Figura 90. Resultado de energia dissipada total para a mistura E (granulometria SMA 11S e CAP 30/45)

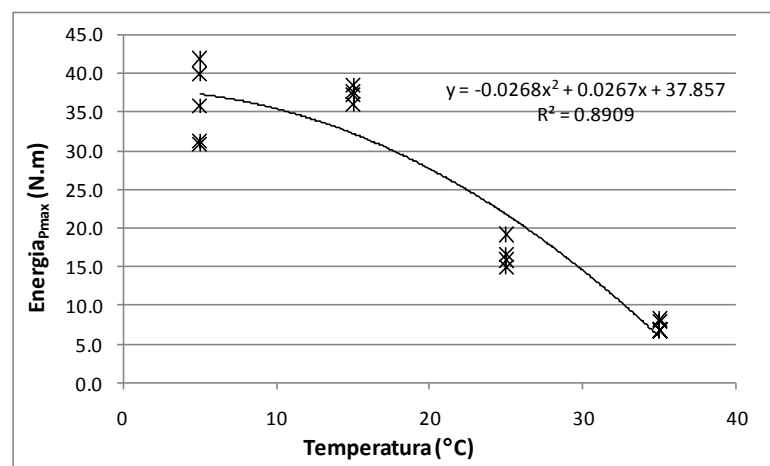


Figura 91. Resultado de energia dissipada até o ponto de carga máxima para a mistura E (granulometria SMA 11S e CAP 30/45)

Mistura F

Tabela 15. Resultados obtidos para a mistura F (granulometria GAP 12,5mm e CAP 30/45)

Mistura	Temp (°C)	RT (MPa)	P _{max} (kN)	d @ P _{max} (mm)	Energia _{total} (N.m)	Energia _{Pmax} (N.m)
(F)	5	3,76	38,50	1,52	61,55	30,49
	5	3,34	34,30	1,51	79,99	25,47
	5	3,48	35,40	1,69	71,09	24,27
	5	3,62	36,40	1,77	46,13	28,88
	5	3,11	31,60	1,93	75,15	27,43
	15	2,14	20,80	2,18	85,18	26,43
	15	2,31	22,40	2,02	113,69	26,56
	15	2,11	20,70	2,85	100,70	36,68
	15	2,17	21,10	2,11	88,11	26,70
	15	2,30	22,20	2,44	112,25	34,12
	25	1,14	12,40	2,77	74,22	23,50
	25	1,25	13,10	1,93	59,06	16,16
	25	1,19	12,40	2,52	78,10	22,17
	25	1,22	12,60	2,60	64,12	20,17
	25	1,19	12,20	2,60	67,58	22,93
	35	0,49	4,81	2,26	36,05	7,53
	35	0,47	4,67	2,52	31,51	8,96
	35	0,48	4,76	2,18	33,42	7,15
	35	0,49	4,92	2,69	37,60	9,77
	35	0,50	4,97	2,18	35,90	7,63

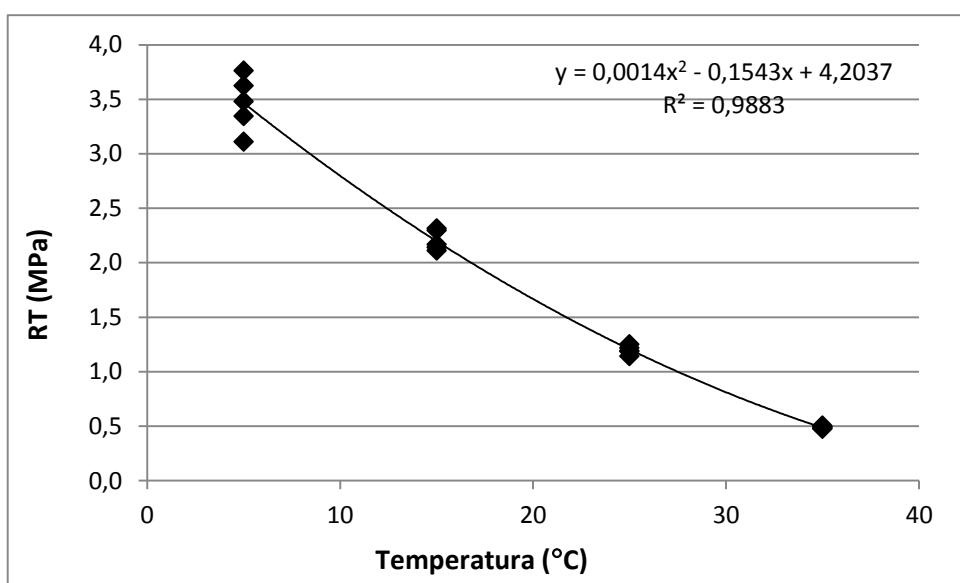


Figura 92. Resultado de RT para a mistura F (granulometria GAP 12,5mm e CAP 30/45)

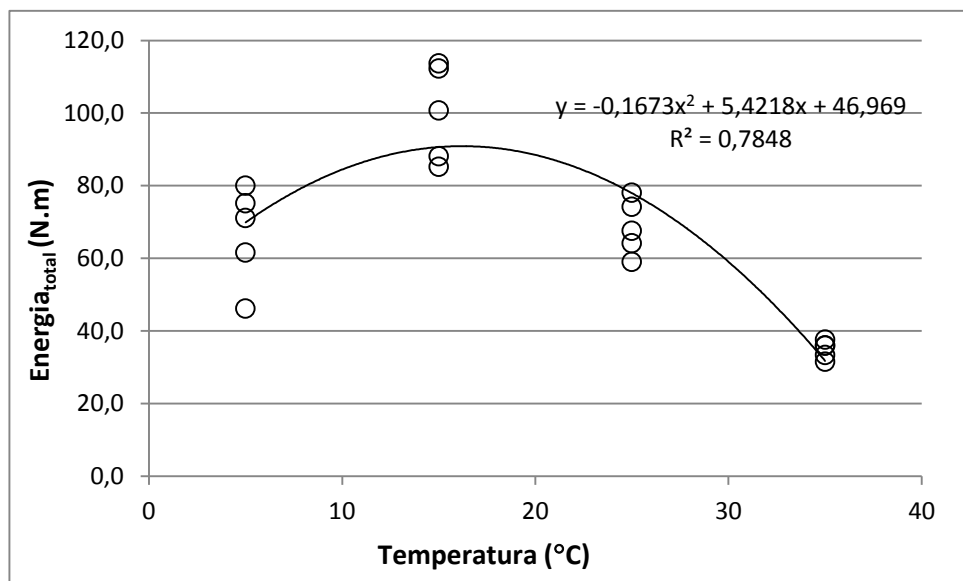


Figura 93. Resultado de energia dissipada total para a mistura F (granulometria GAP 12,5mm e CAP 30/45)

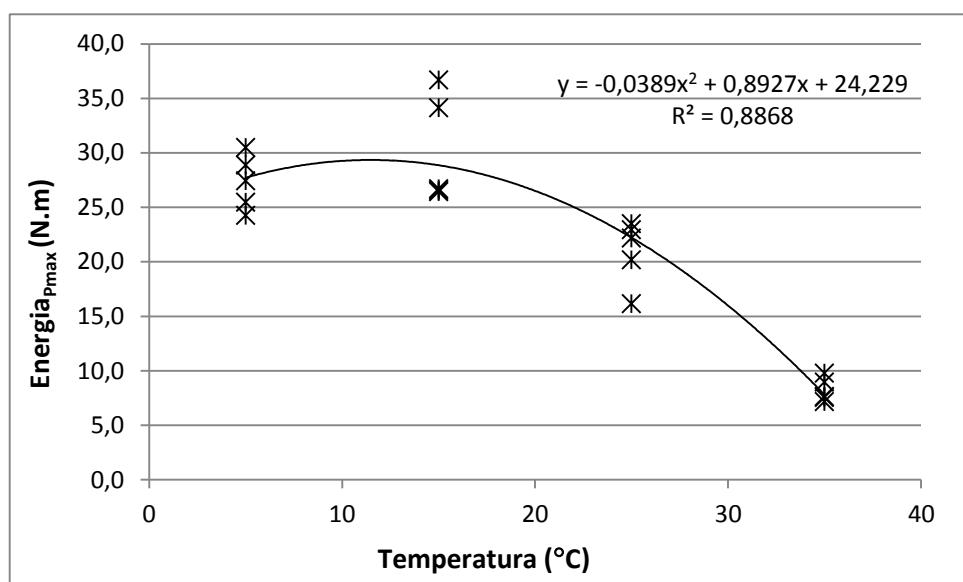


Figura 94. Resultado de energia dissipada até o ponto de carga máxima para a mistura F (granulometria GAP 12,5mm e CAP 30/45)

Mistura H

Tabela 16. Resultados obtidos para a mistura H (granulometria CPA 12,5mm e CAP 30/45)

Mistura	Temp (°C)	RT (MPa)	P _{max} (kN)	d @ P _{max} (mm)	Energia _{total} (N.m)	Energia _{Pmax} (N.m)
(H)	5	2,76	28,50	1,51	64,89	18,02
	5	2,57	26,66	1,85	54,99	24,06
	5	2,73	28,30	2,27	72,04	34,67
	5	2,44	25,50	1,51	42,94	19,24
	15	2,07	21,40	2,02	85,48	23,27
	15	1,79	18,60	1,78	68,32	19,91
	15	1,95	19,81	1,52	65,07	17,89
	15	2,12	21,70	1,86	67,04	23,97
	15	2,11	21,40	1,77	55,33	21,04
	25	0,94	9,94	2,02	47,07	13,15
	25	0,93	9,71	2,01	58,45	12,07
	25	0,98	10,10	2,10	50,08	13,73
	25	0,97	10,10	1,68	52,67	11,98
	35	0,39	4,16	1,77	26,43	4,72
	35	0,36	3,81	1,85	25,36	4,75
	35	0,40	4,19	1,76	21,06	4,91
	35	0,34	3,61	1,85	25,97	4,69
	35	0,34	3,52	1,76	22,03	3,74

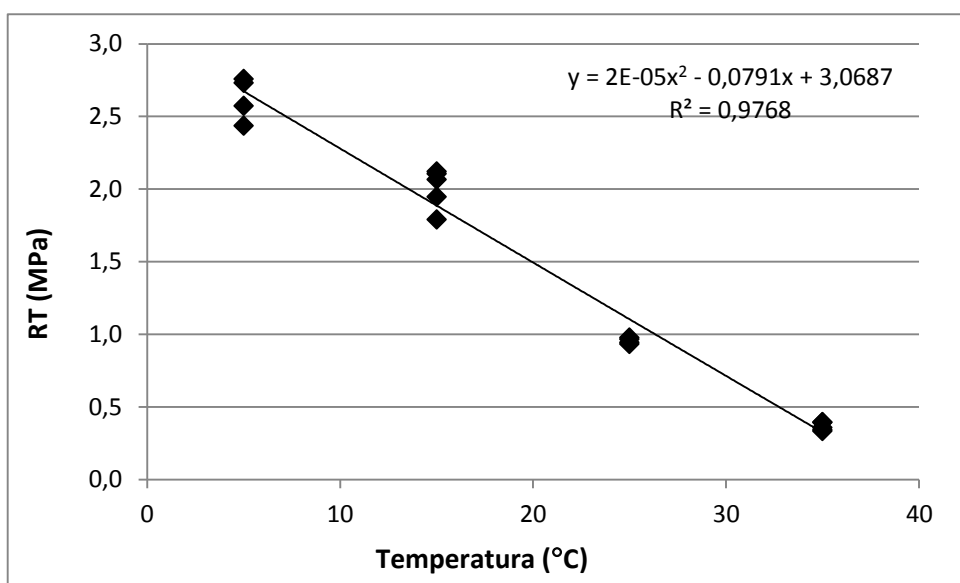


Figura 95. Resultado de RT para a mistura H (granulometria CPA 12,5mm e CAP 30/45)

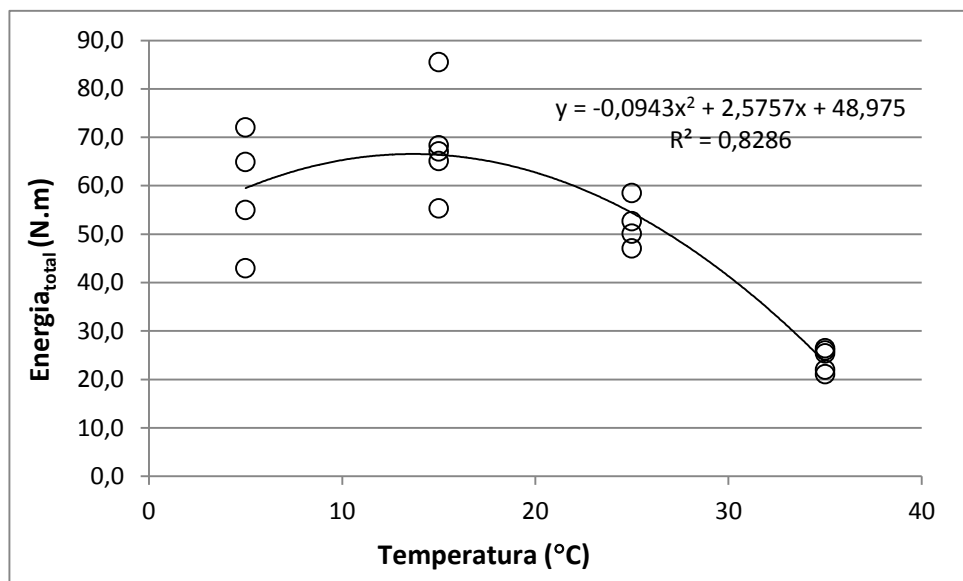


Figura 96. Resultado de energia dissipada total para a mistura H (granulometria CPA 12,5mm e CAP 30/45)

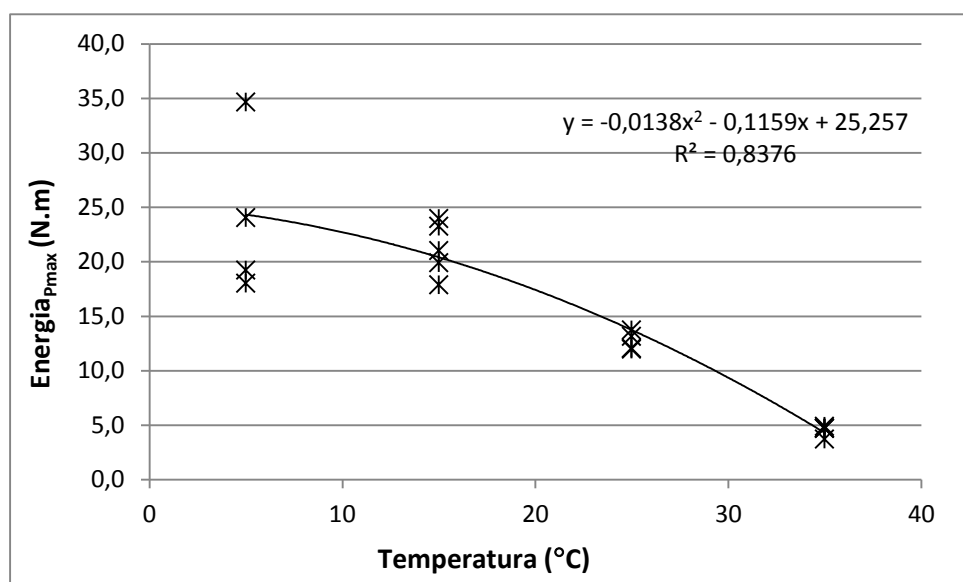


Figura 97. Resultado de energia dissipada até o ponto de carga máxima para a mistura H (granulometria CPA 12,5mm e CAP 30/45)

Mistura J

Tabela 17. Resultados obtidos para a mistura J (granulometria SPV 12,5mm e ligante modificado por SBS 60/85)

Mistura	Temp (°C)	RT (MPa)	P _{max} (kN)	d @ P _{max} (mm)	Energia _{total} (N.m)	Energia _{Pmax} (N.m)
(J)	5	5.50	54.50	1.68	100.05	38.36
	5	5.58	56.40	1.60		38.91
	5	4.89	49.60	1.78	96.91	39.18
	5	5.33	53.80	2.19	83.97	44.58
	5	5.38	55.10	1.93	75.22	44.81
	5	5.30	53.80	1.77	88.25	41.35
	15	3.31	33.20	2.36	61.26	30.89
	15	3.49	35.10	1.76	71.89	32.55
	15	2.75	27.90	1.85	74.35	29.52
	15	3.33	33.50	2.27	85.79	44.10
	15	3.61	36.20	1.68	55.28	32.19
	25	1.77	18.00	2.10	70.79	22.65
	25	1.82	18.50	2.19	88.86	23.67
	25	1.96	20.00	2.28	81.93	24.47
	35	0.93	9.23	1.93	41.50	11.60
	35	0.98	9.84	1.43	36.98	8.33
	35	0.98	9.84	1.68	34.88	10.21
	35	0.90	9.05	1.52	37.50	8.51
	35	0.90	8.97	2.52	39.42	12.51

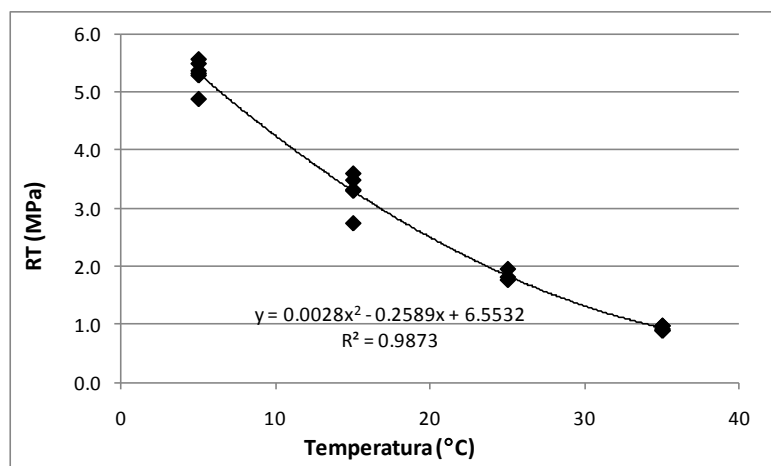


Figura 98. Resultado de RT para a mistura J (granulometria SPV 12,5mm e ligante modificado por SBS 60/85)

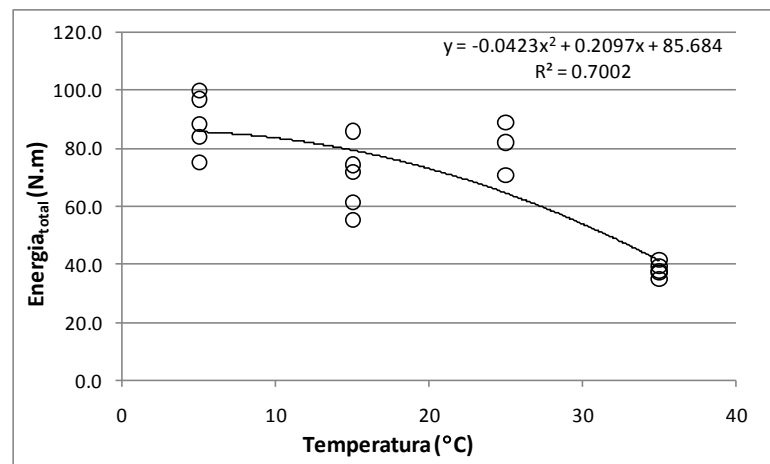


Figura 99. Resultado de energia dissipada total para a mistura J (granulometria SPV 12,5mm e ligante modificado por SBS 60/85)

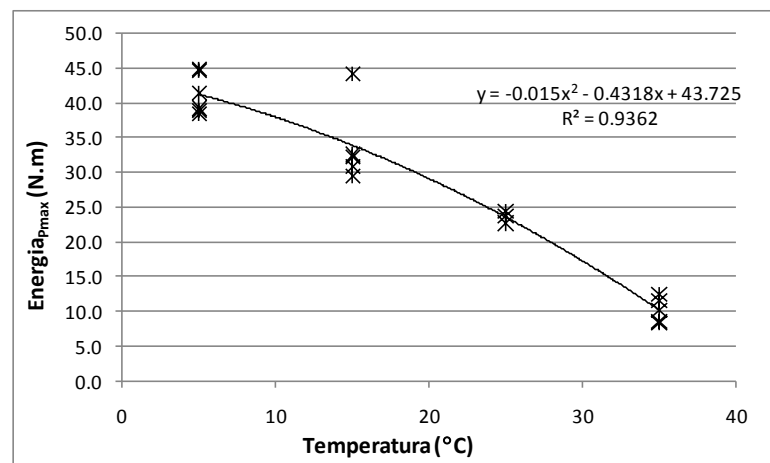


Figura 100. Resultado de energia dissipada até o ponto de carga máxima para a mistura J (granulometria SPV 12,5mm e ligante modificado por SBS 60/85)

Mistura L

Tabela 18. Resultados obtidos para a mistura L (granulometria SMA 8S e ligante modificado por polímero SBS 60/85)

Mistura	Temp (°C)	RT (MPa)	P _{max} (kN)	d @ P _{max} (mm)	Energia _{total} (N.m)	Energia _{Pmax} (N.m)
(L)	5	4,59	46,80	2,78	98,54	46,58
	5	4,55	46,70	2,26	102,70	48,56
	5	4,44	45,60	2,19	92,24	43,55
	5	4,85	49,20	2,01	117,02	44,26
	5	4,53	46,10	1,93	100,24	41,28
	15	2,72	26,90	2,19	115,67	32,67
	15	2,64	26,00	2,52	128,10	41,67
	15	2,70	26,80	2,35	116,85	38,48
	15	2,69	26,70	2,35	94,99	38,52
	15	2,67	26,40	2,51	111,31	41,99
	25	1,13	11,70	3,36	114,07	27,39
	25	1,03	11,00	3,61	103,08	24,98
	25	1,18	12,20	2,77	98,17	21,35
	25	1,18	12,10	2,69	114,77	21,98
	25	1,20	12,40	3,11	97,20	25,84
	35	0,62	6,09	2,69	55,29	11,25
	35	0,65	6,53	2,60	54,22	11,85
	35	0,73	7,16	2,19	55,40	10,49
	35	0,60	6,05	2,11	55,88	10,00
	35	0,65	6,42	2,36	57,53	9,77

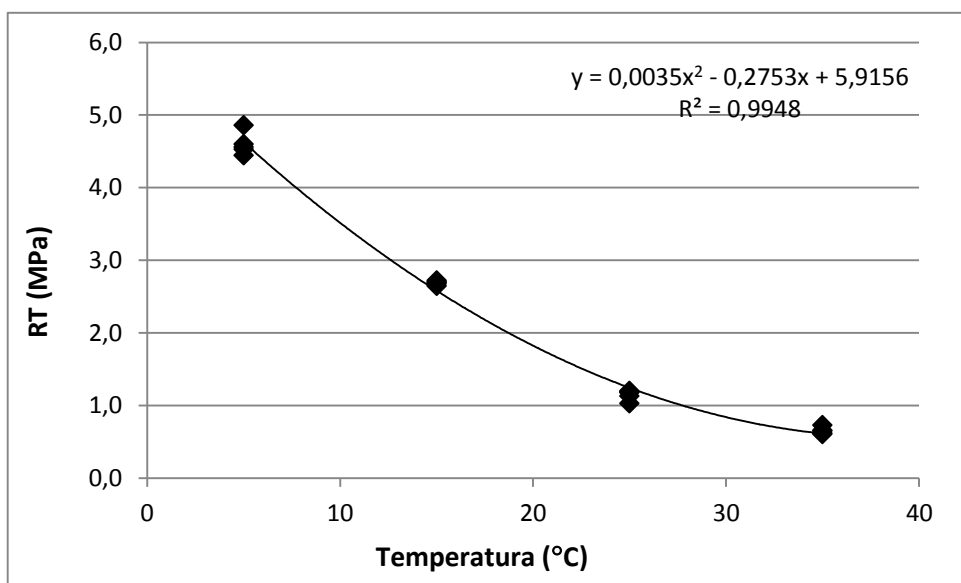


Figura 101. Resultado de RT para a mistura L (granulometria SMA 8S e ligante modificado por polímero SBS 60/85)

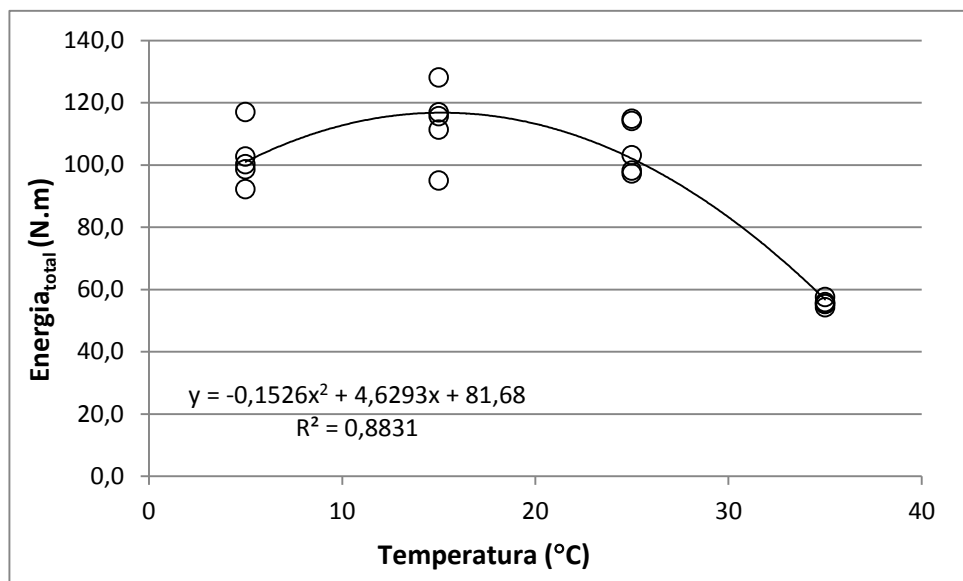


Figura 102. Resultado de energia dissipada total para a mistura L (granulometria SMA 8S e ligante modificado por polímero SBS 60/85)

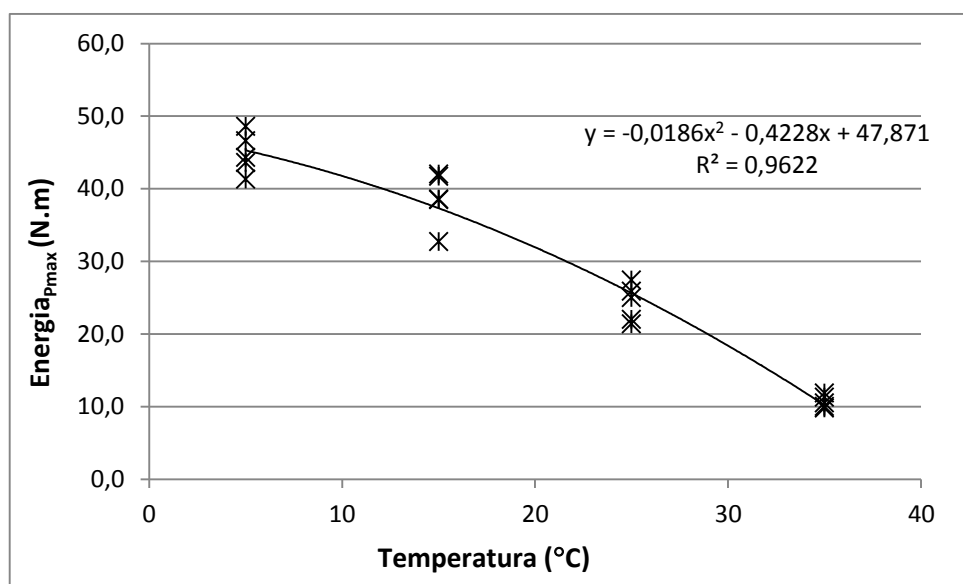


Figura 103. Resultado de energia dissipada até o ponto de carga máxima para a mistura L (granulometria SMA 8S e ligante modificado por polímero SBS 60/85)

Mistura M

Tabela 19. Resultados obtidos para a mistura M (granulometria SMA 11S e ligante modificado por polímero SBS 60/85)

Mistura	Temp (°C)	RT (MPa)	P _{max} (kN)	d @ P _{max} (mm)	Energia _{total} (N.m)	Energia _{Pmax} (N.m)
(M)	5	4,60	47,50	1,94	93,56	42,36
	5	3,91	40,70	1,76	113,62	31,17
	5	4,11	42,00	2,18	105,80	46,36
	5	4,34	44,50	2,10		43,73
	5	4,55	46,40	2,35		47,92
	15	2,72	26,10	2,35	108,09	37,69
	15	2,63	25,40	2,27	109,34	32,76
	15	2,73	26,40	2,61	104,37	43,57
	15	2,78	26,70	2,35	121,24	38,18
	15	2,86	27,80	2,68	104,65	42,12
	25	1,30	13,20	2,52	89,38	19,87
	25	1,34	13,72	2,60	97,97	22,19
	25	1,06	10,90	2,94	92,36	18,94
	25	1,28	13,40	2,44	91,94	19,02
	25	1,29	13,20	2,52	105,27	20,56
	35	0,72	6,93	2,35	49,36	11,21
	35	0,74	7,18	2,69	55,26	13,10
	35	0,73	7,06	2,52	53,33	12,62
	35	0,69	6,68	2,60	55,03	12,33
	35	0,64	6,26	2,60	52,08	11,16

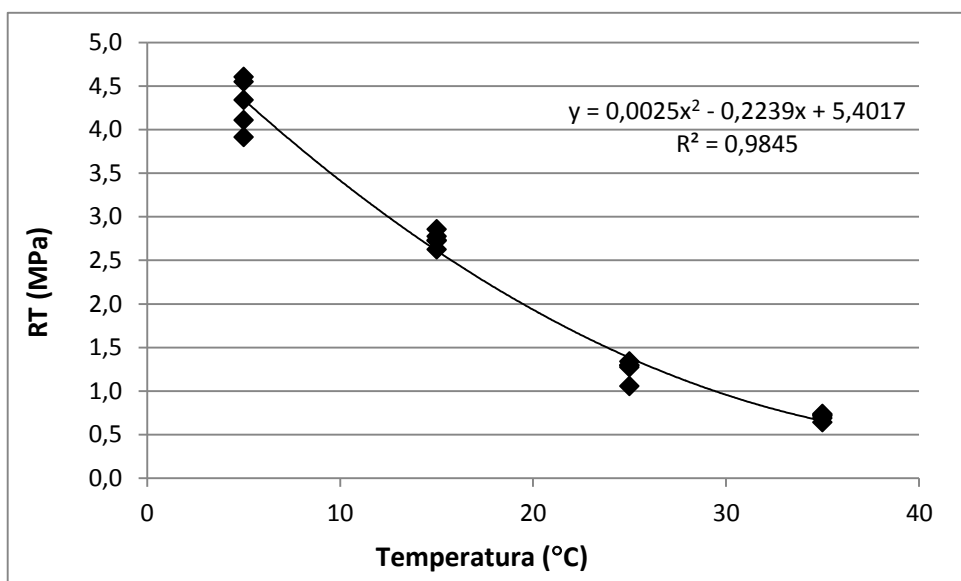


Figura 104. Resultado de RT para a mistura M (granulometria SMA 11S e ligante modificado por polímero SBS 60/85)

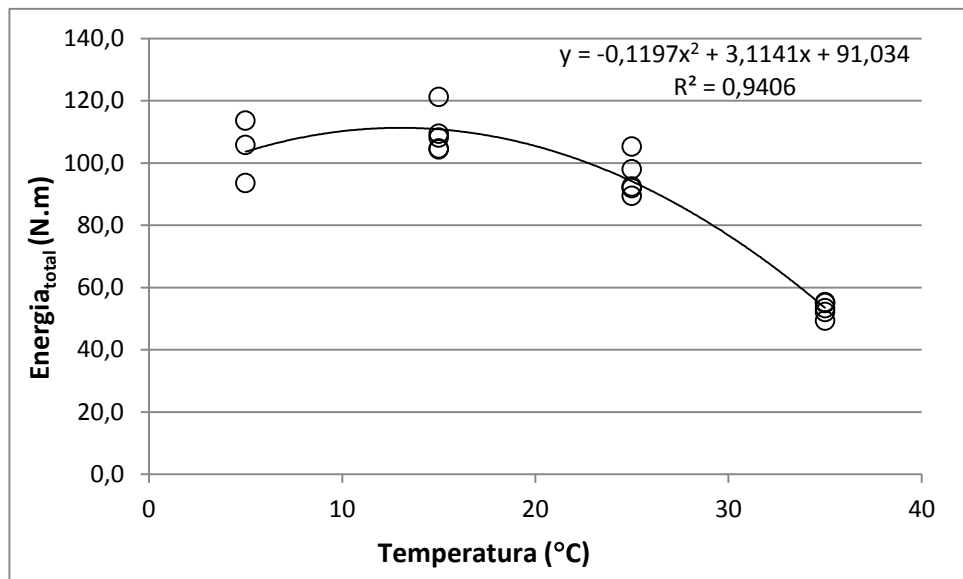


Figura 105. Resultado de energia dissipada total para a mistura M (granulometria SMA 11S e ligante modificado por polímero SBS 60/85)

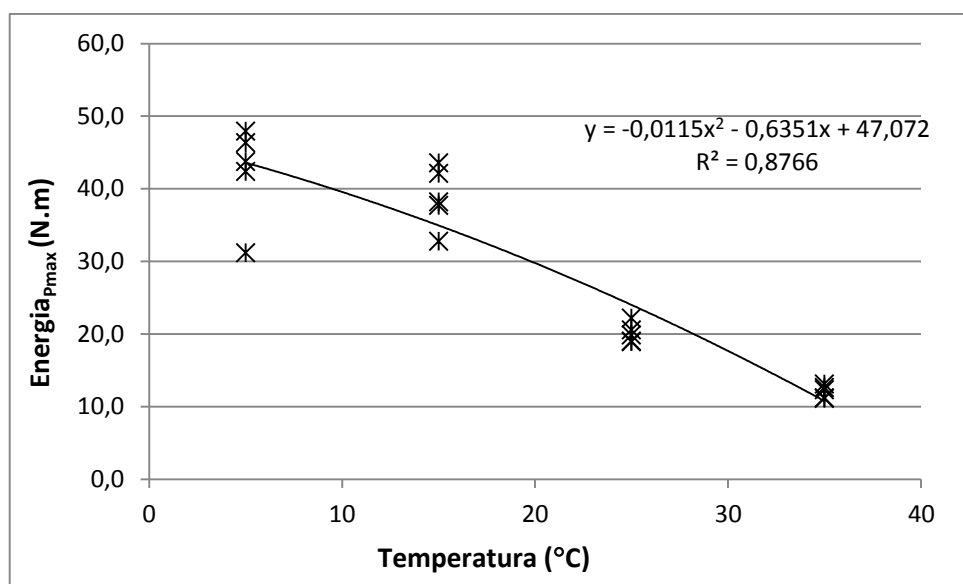


Figura 106. Resultado de energia dissipada até o ponto de carga máxima para a mistura M (granulometria SMA 11S e ligante modificado por polímero SBS 60/85)

Mistura N

Tabela 20. Resultados obtidos para a mistura N (granulometria GAP 12,5mm e ligante modificado por polímero SBS 60/85)

Mistura	Temp (°C)	RT (MPa)	P _{max} (kN)	d @ P _{max} (mm)	Energia _{total} (N.m)	Energia _{Pmax} (N.m)
(N)	5	3,72	38,50	1,85	85,43	32,37
	5	3,89	40,40	2,19	95,53	37,59
	5	4,20	43,46	2,27	96,95	46,41
	5	3,95	39,70	2,02	97,60	39,57
	15	3,30	30,30	2,35	101,58	39,04
	15	2,77	26,20	2,27	91,60	36,49
	15	2,93	27,40	2,10	80,06	34,94
	15	3,03	28,38	2,27	95,33	37,77
	15	3,23	30,50	2,01	89,98	34,95
	25	1,16	11,80	2,02	78,69	15,61
	25	1,20	12,00	2,27	84,53	18,54
	25	1,11	11,20	3,02	83,25	21,64
	25	1,12	11,40	2,36	87,04	18,01
	25	1,24	12,80	3,11	83,66	25,23
	25	1,28	13,10	2,35	95,67	19,91
	35	0,67	6,38	2,35	49,70	10,43
	35	0,75	7,16	1,85	51,11	8,49
	35	0,73	6,94	2,02	48,79	8,88
	35	0,78	7,37	1,85	47,22	8,11
	35	0,77	7,20	2,18	45,80	9,77

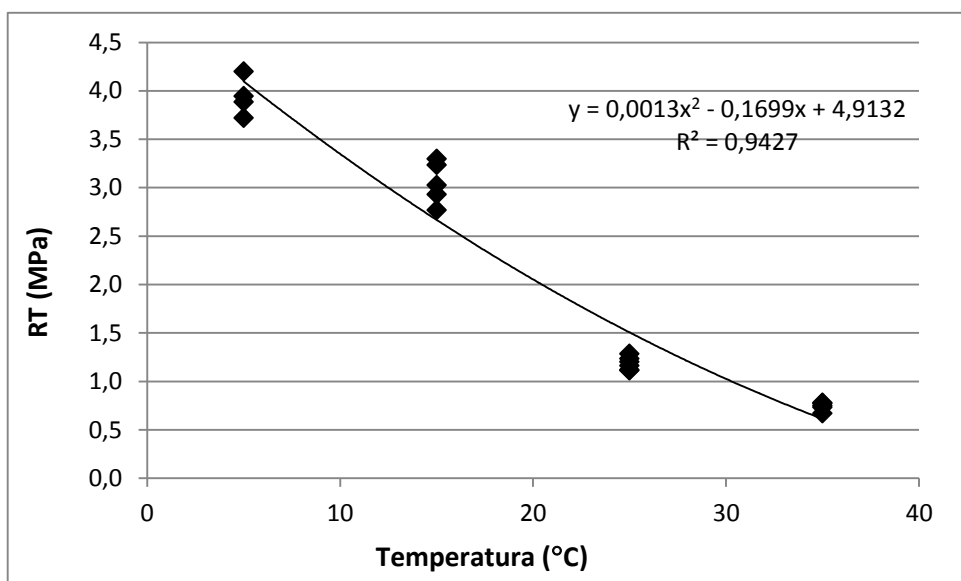


Figura 107. Resultado de RT para a mistura N (granulometria GAP 12,5mm e ligante modificado por polímero SBS 60/85)

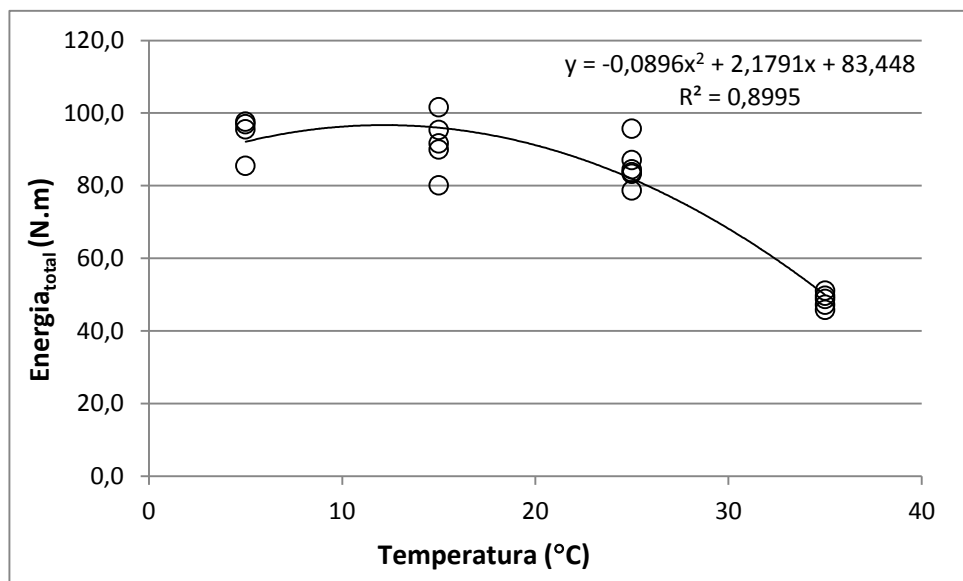


Figura 108. Resultado de energia dissipada total para a mistura N (granulometria GAP 12,5mm e ligante modificado por polímero SBS 60/85)

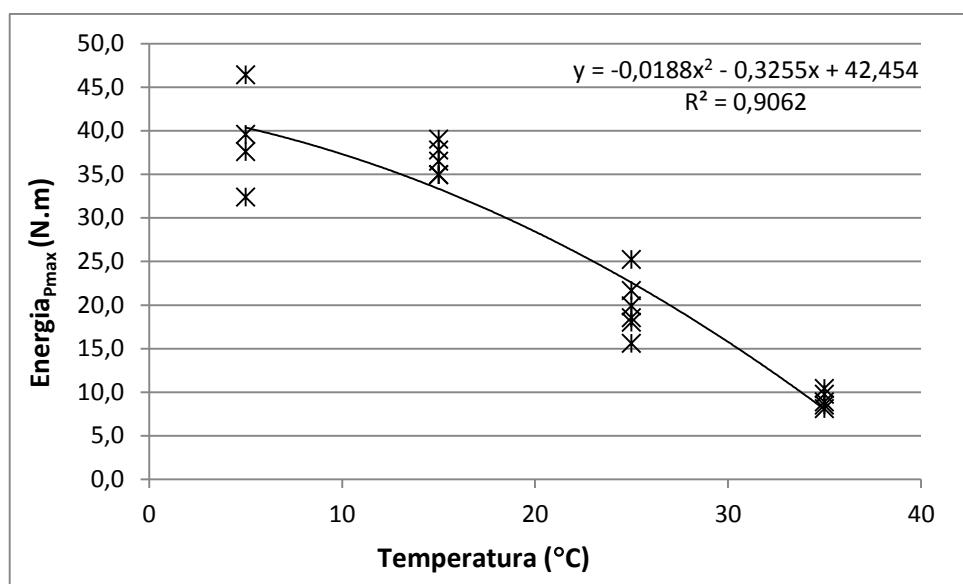


Figura 109. Resultado de energia dissipada até o ponto de carga máxima para a mistura N (granulometria GAP 12,5mm e ligante modificado por polímero SBS 60/85)

Mistura P

Tabela 21. Resultados obtidos para a mistura P (granulometria CPA 12,5mm e ligante modificado por polímero SBS 60/85)

Mistura	Temp (°C)	RT (MPa)	P _{max} (kN)	d @ P _{max} (mm)	Energia _{total} (N.m)	Energia _{Pmax} (N.m)
(P)	5	2,74	28,30	1,93	89,11	30,56
	5	2,31	24,10	1,93	48,77	21,52
	15	2,12	21,70	2,60	94,38	32,79
	15	2,23	22,90	2,27	102,70	31,06
	15	2,21	22,70	2,27	100,48	30,59
	15	2,07	21,10	2,60	104,03	34,87
	15	2,20	22,60	1,93	87,80	26,08
	25	0,93	9,30	2,69	57,60	16,55
	25	0,88	8,92	2,35	71,81	14,42
	25	0,85	8,79	2,77	60,20	17,37
	25	0,91	9,35	2,68	56,30	17,11
	35	0,48	4,94	2,01	28,04	6,70
	35	0,52	5,30	2,02	29,04	5,93
	35	0,52	5,28	1,51	30,72	4,79
	35	0,42	4,34	1,84	30,59	5,07
	35	0,45	4,62	2,26	30,54	7,18

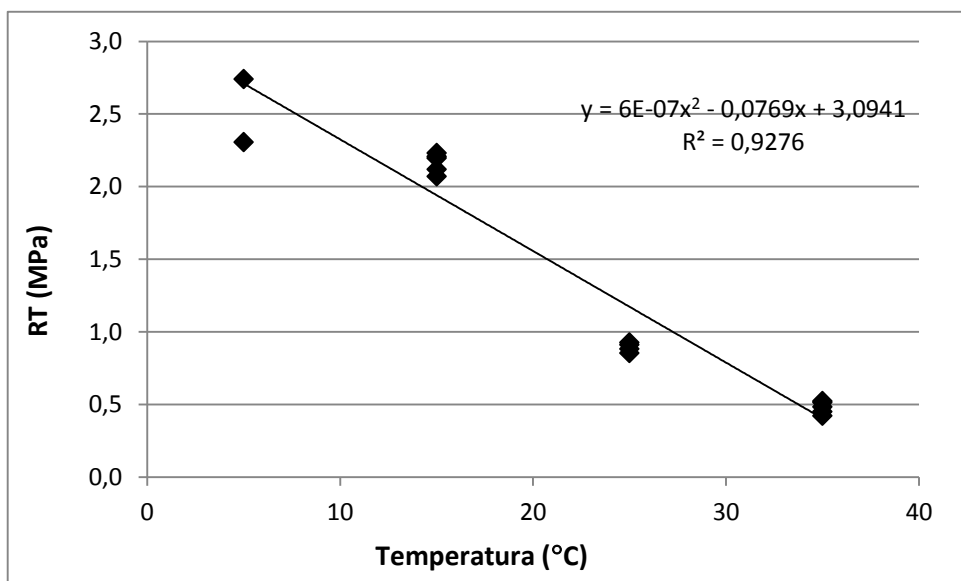


Figura 110. Resultado de RT para a mistura P (granulometria CPA 12,5mm e ligante modificado por polímero SBS 60/85)

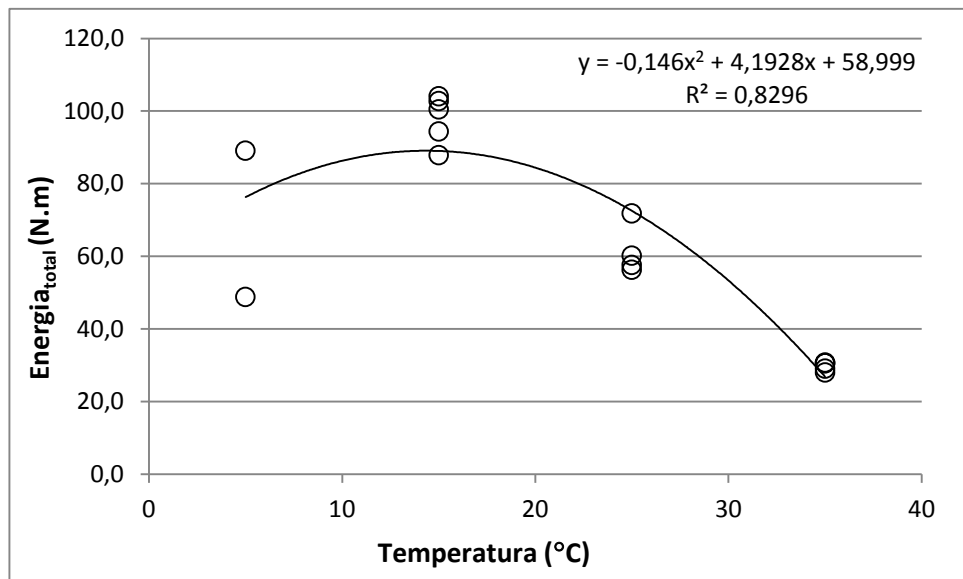


Figura 111. Resultado de energia dissipada total para a mistura P (granulometria CPA 12,5mm e ligante modificado por polímero SBS 60/85)

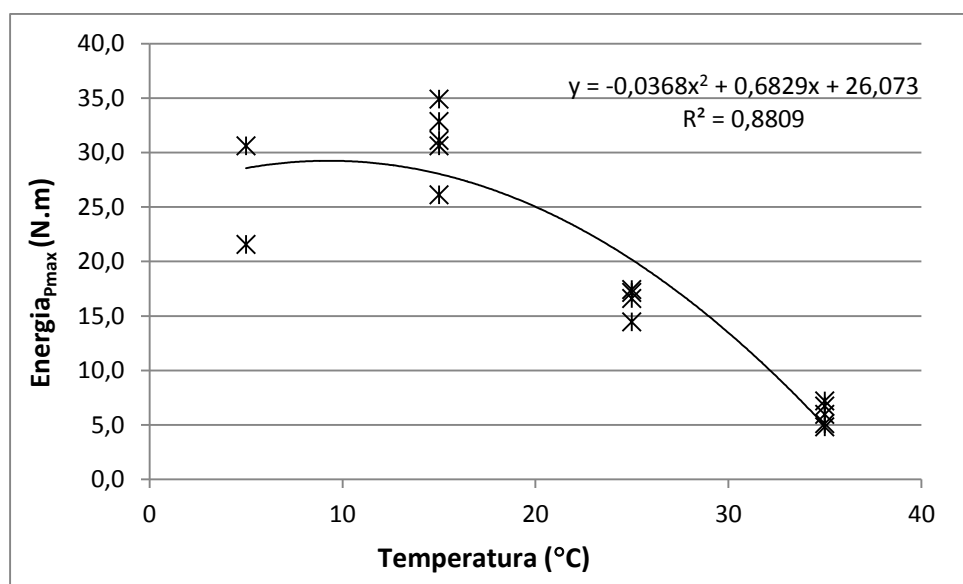


Figura 112. Resultado de energia dissipada até o ponto de carga máxima para a mistura P (granulometria CPA 12,5mm e ligante modificado por polímero SBS 60/85)

Mistura R

Tabela 22. Resultados obtidos para a mistura R (granulometria SPV 12,5mm e ligante modificado por borracha)

Mistura	Temp (°C)	RT (MPa)	P _{max} (kN)	d @ P _{max} (mm)	Energia _{total} (N.m)	Energia _{Pmax} (N.m)
(R)	5	4,65	47,90	2,35	132,71	59,42
	5	4,44	46,00	2,10	103,88	51,32
	5	3,90	40,50	2,43	122,46	53,56
	5	4,41	46,00	2,10	99,86	47,96
	5	3,74	38,90	2,86	112,32	59,76
	15	3,03	30,50	1,76	77,92	27,53
	15	2,74	28,40	1,60	59,75	25,32
	15	2,52	26,20	1,85	57,11	27,22
	15	1,90	20,10	1,84	58,17	20,49
	15	1,76	18,80	1,51	63,97	15,90
	25	1,41	14,60	1,77	54,62	15,53
	25	1,31	13,50	1,93	57,33	15,29
	25	1,31	13,50	1,84	61,82	14,79
	25	1,40	14,40	1,84	65,47	16,20
	25	1,42	14,70	2,01	56,47	18,41
	35	1,15	11,50	1,51	38,19	10,39
	35	1,10	10,20	1,69	32,66	9,83
	35	0,98	10,00	1,68	29,48	9,55
	35	1,02	10,10	1,43	34,92	7,72
	35	1,15	11,60	1,60	34,59	10,09

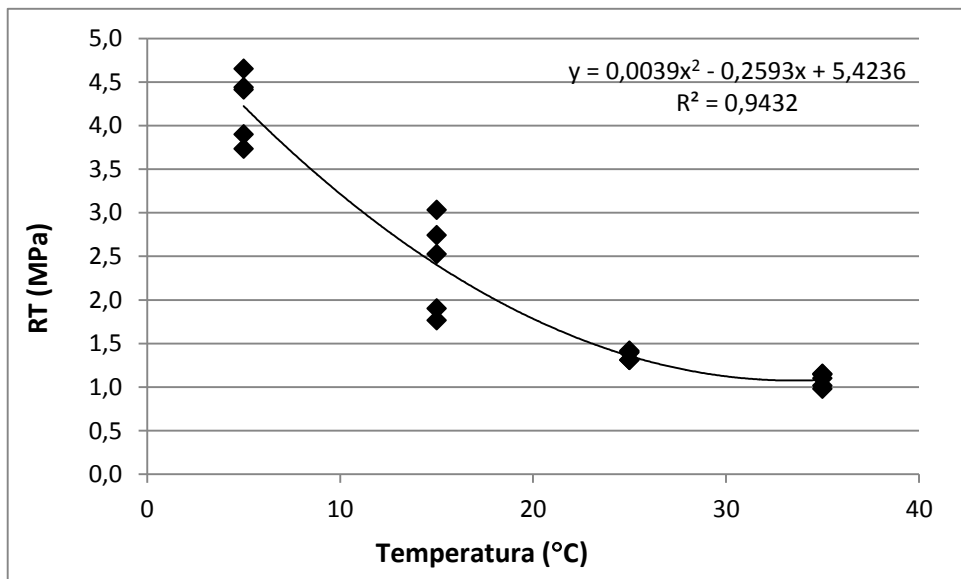


Figura 113. Resultado de RT para a mistura R (granulometria SPV 12,5mm e ligante modificado por borracha)

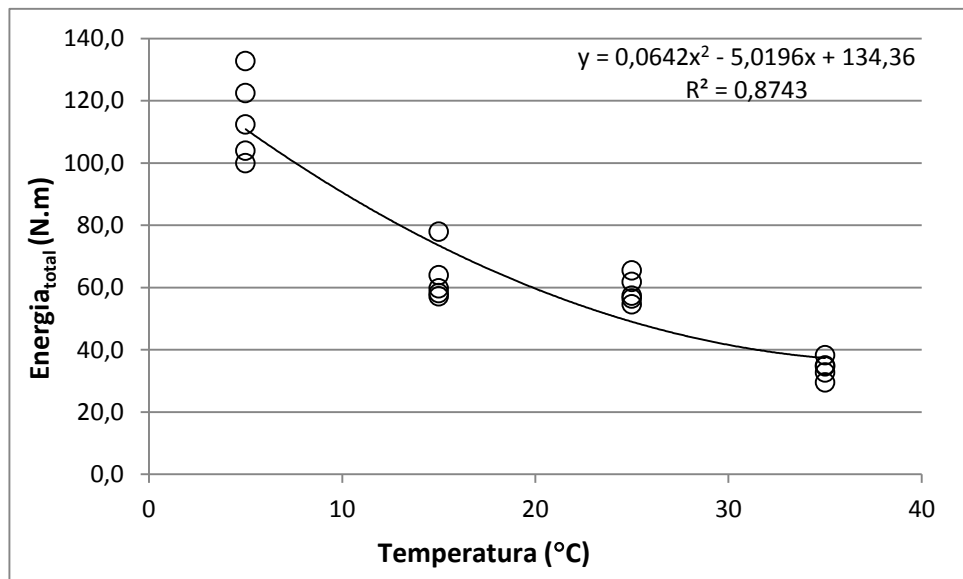


Figura 114. Resultado de energia dissipada total para a mistura R (granulometria SPV 12,5mm e ligante modificado por borracha)

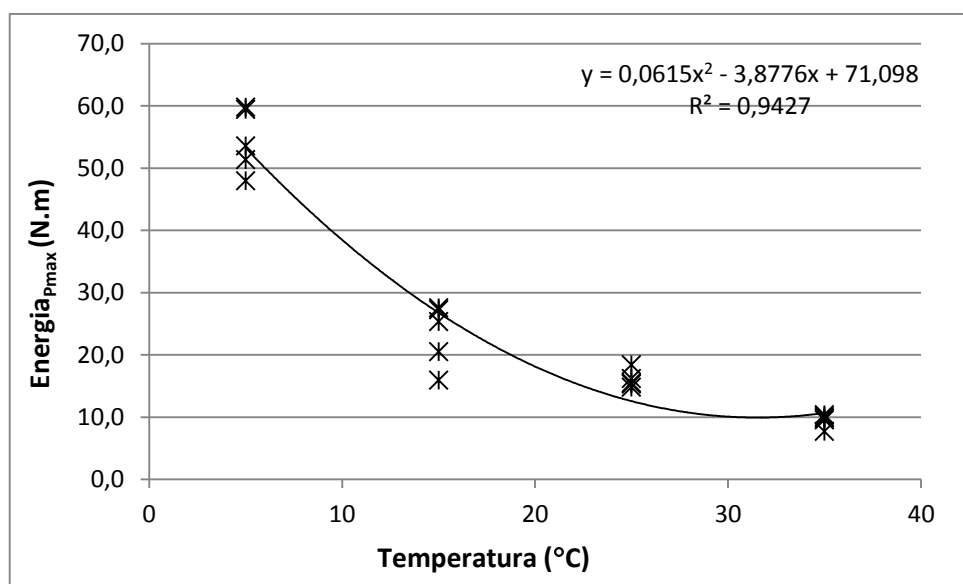


Figura 115. Resultado de energia dissipada até o ponto de carga máxima para a mistura R (granulometria SPV 12,5mm e ligante modificado por borracha)

Mistura Z

Tabela 23. Resultados obtidos para a mistura Z (granulometria SPV 12,5mm e ligante modificado por RET)

Mistura	Temp (°C)	RT (MPa)	P _{max} (kN)	d @ P _{max} (mm)	Energia _{total} (N.m)	Energia _{Pmax} (N.m)
(Z)	5	5.26	54.40	1.76	71.32	41.78
	5	5.48	56.40	1.68	52.58	37.00
	5	4.62	48.30	1.68	82.27	34.44
	5	4.62	48.80	1.76	58.68	35.50
	5	4.72	49.50	1.76	64.95	33.00
	15	3.31	33.10	1.93	66.89	34.04
	15	3.87	38.50	1.72	73.57	39.75
	15	3.78	37.60	1.76	66.43	35.59
	15	3.15	31.70	1.93	71.61	33.08
	15	3.49	35.00	1.60	54.19	29.10
	25	1.55	16.03	2.02	77.16	20.84
	25	1.61	16.56	2.02	66.74	20.36
	25	1.53	15.90	2.01	68.59	20.33
	25	1.62	16.80	1.92	78.78	21.17
	35	0.93	9.35	1.85	38.40	10.83
	35	0.84	8.36	1.76	33.06	8.87
	35	0.85	8.52	1.60	31.11	8.93
	35	0.89	8.98	1.60	33.58	8.41
	35	0.84	8.38	1.51	30.74	8.03

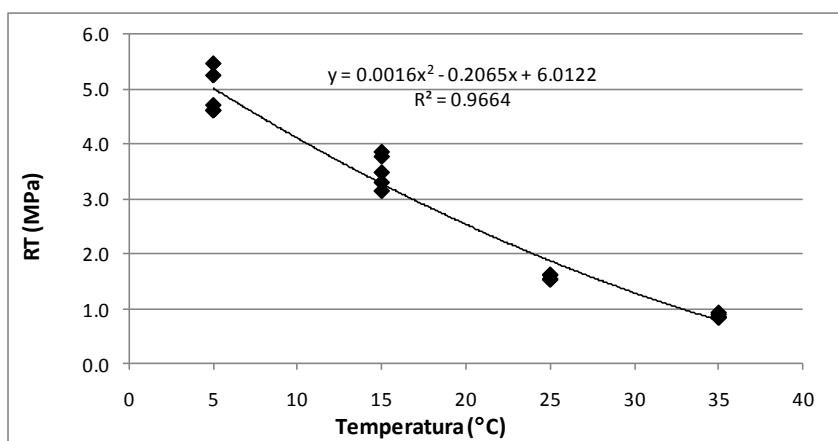


Figura 116. Resultado de RT para a mistura Z (granulometria SPV 12,5mm e ligante modificado por RET)

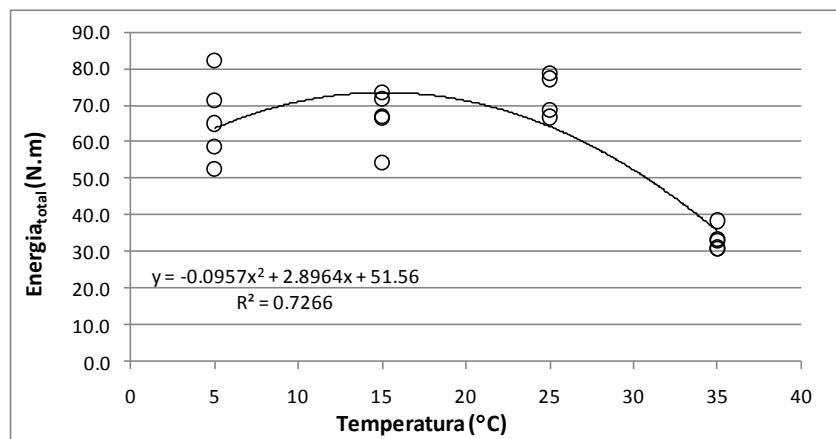


Figura 117. Resultado de energia dissipada total para a mistura Z (granulometria SPV 12,5mm e ligante modificado por RET)

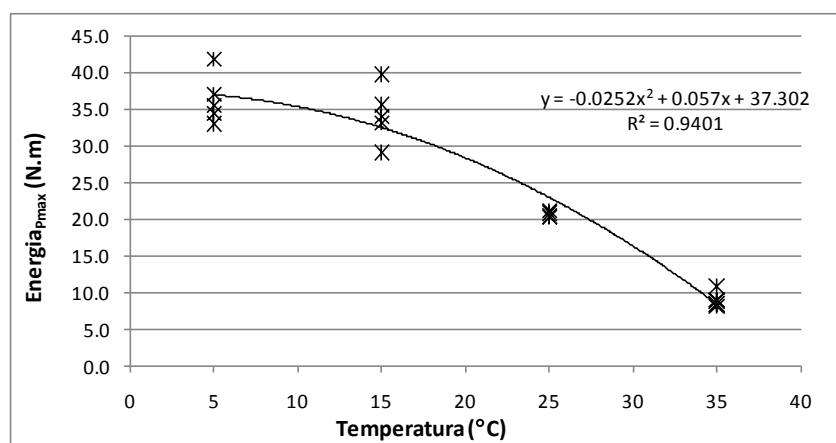
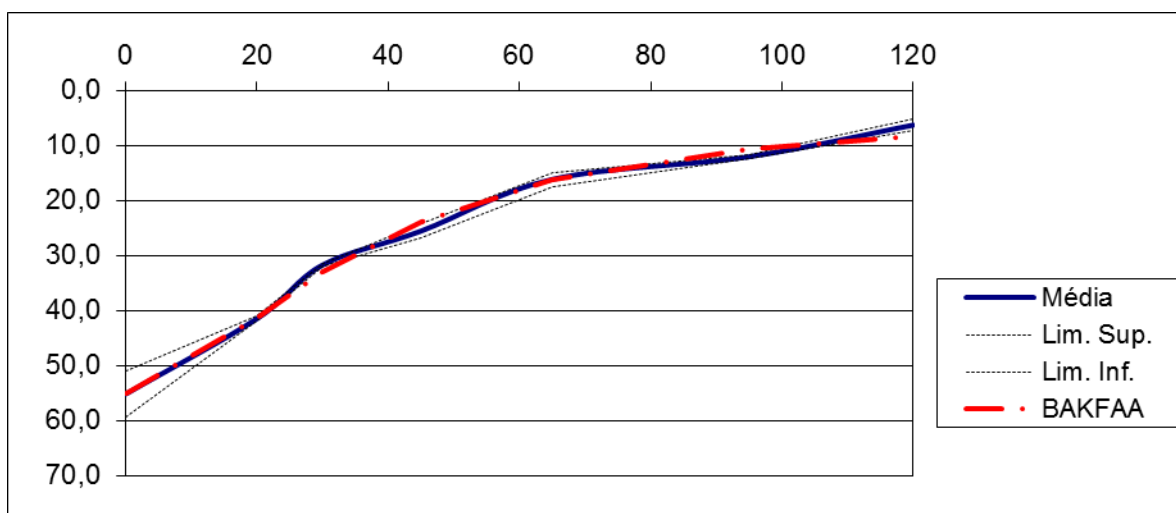


Figura 118. Resultado de energia dissipada até o ponto de carga máxima para a mistura Z (granulometria SPV 12,5mm e ligante modificado por RET)

ANEXO B

(RETROANÁLISES)

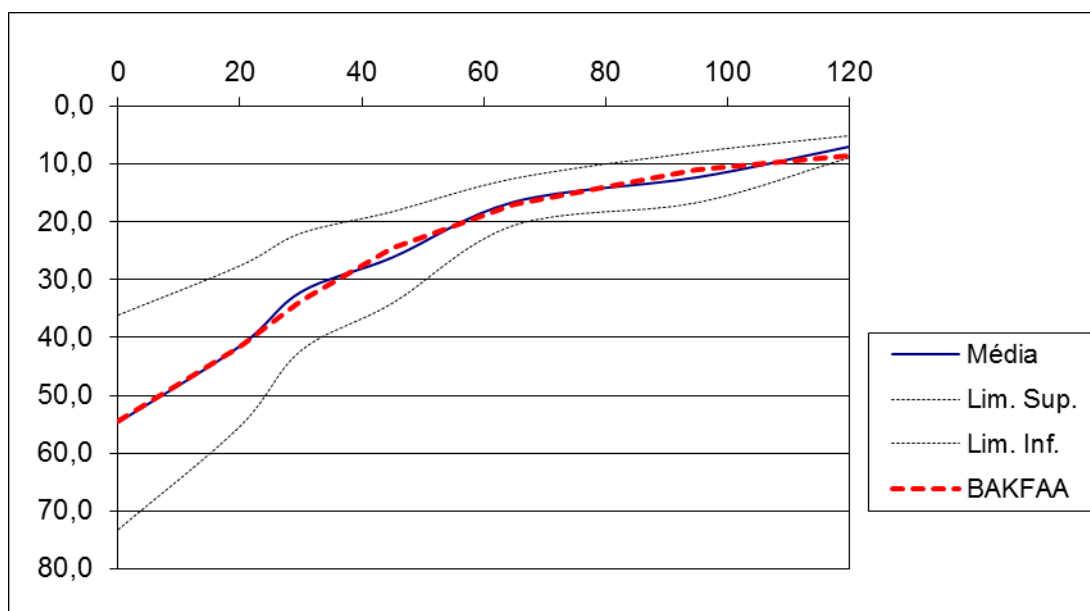
Km	VALORES DE DEFLEXÃO (0,01mm)						
	Df1	Df2	Df3	Df4	Df5	Df6	Df7
	0	20	30	45	65	95	120
435,595	56,1	41,5	31,6	25,2	15,8	11,9	6,0
435,585	54,1	41,3	31,7	25,8	16,4	12,1	6,5
Média	55,1	41,4	31,7	25,5	16,1	12,0	6,3
Desv. Padrão	1,41	0,14	0,07	0,42	0,42	0,14	0,35
Lim. Sup.	59,34	41,82	31,86	26,77	17,37	12,42	7,31
Lim. Inf.	50,86	40,98	31,44	24,23	14,83	11,58	5,19
BAKFAA	54,92	41,25	32,97	23,84	16,31	10,62	8,23



Camada	Módulo Calculado	Espessura (cm)	Módulo Laboratório
CBUQ HiMA	2655	7,5	2494
CBUQ Velho	1096	7,0	
Infra. Rem.	114	-	

Figura 119. Retroanálise Faixa 1 – Segmento 1.I

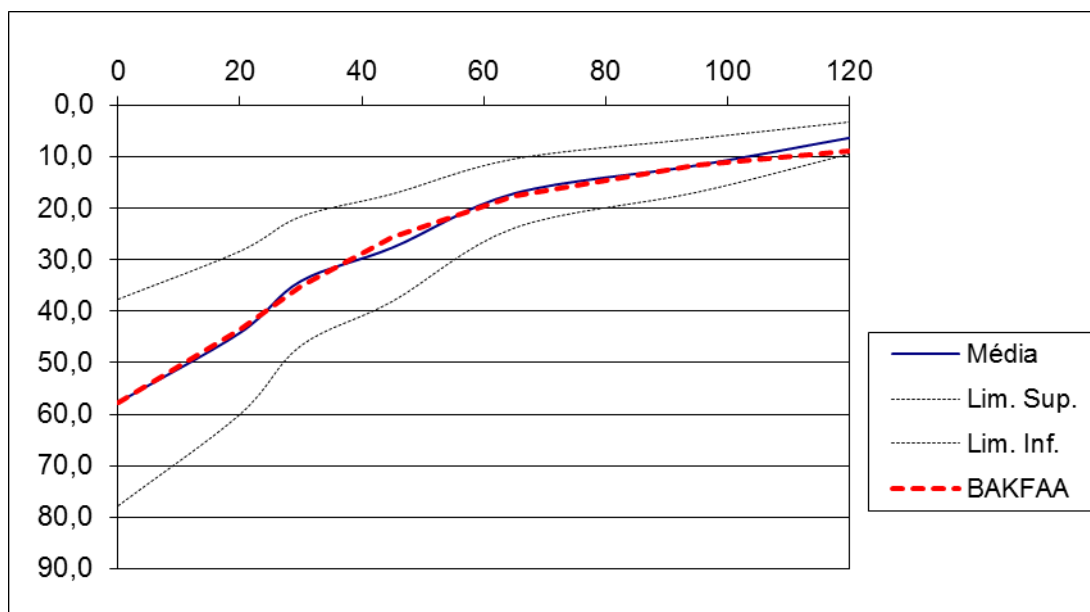
Km	VALORES DE DEFLEXÃO (0,01mm)						
	Df1	Df2	Df3	Df4	Df5	Df6	Df7
	0	20	30	45	65	95	120
435,575	53,3	42,2	32,5	26,6	17,3	13,2	7,3
435,565	60,5	45,7	35,6	28,6	17,1	13,4	7,5
435,555	58,7	45,0	34,7	28,1	17,6	13,6	7,2
435,545	60,5	44,3	33,7	27,6	17,3	12,6	7,5
435,535	48,6	37,2	29,2	24,2	15,8	10,9	6,4
435,525	46,4	34,4	26,9	21,8	14,1	10,1	6,0
Média	54,7	41,5	32,1	26,2	16,5	12,3	7,0
Desv. Padrão	6,19	4,63	3,38	2,64	1,35	1,46	0,63
Lim. Sup.	73,22	55,35	42,25	34,07	20,58	16,67	8,88
Lim. Inf.	36,11	27,58	21,95	18,23	12,49	7,93	5,09
BAKFAA	54,39	41,53	33,59	24,59	16,95	11,01	8,51



Camada	Módulo Calculado	Espessura (cm)	Módulo Laboratório
CBUQ SBS	2796	7,5	2679
CBUQ Velho	1279	7,0	
Infra. Reman.	111	-	

Figura 120. Retroanálise Faixa 1 – Segmento 1.II

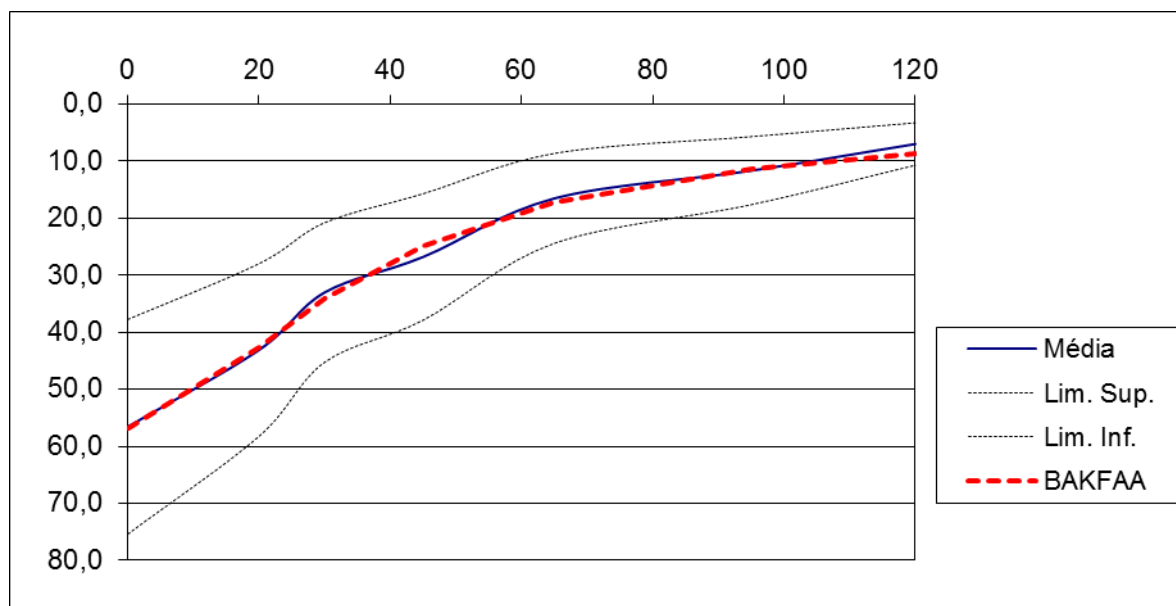
Km	VALORES DE DEFLEXÃO (0,01mm)						
	Df1	Df2	Df3	Df4	Df5	Df6	Df7
	0	20	30	45	65	95	120
435,515	46,9	36,5	27,8	22,4	13,8	9,5	5,1
435,505	52,9	40,4	31,5	25,5	15,7	10,4	6,2
435,495	48,3	35,4	27,0	22,2	14,2	10,0	6,0
435,485	46,8	35,3	26,7	21,4	13,2	8,5	5,1
435,475	50,5	36,7	27,8	21,6	12,8	8,4	4,6
435,465	54,7	43,2	33,5	26,7	16,5	12,0	5,7
435,455	51,6	39,6	31,6	27,3	18,1	13,7	7,7
435,445	54,5	42,0	32,2	26,3	16,4	11,3	7,1
435,435	60,7	44,6	34,6	28,1	17,1	10,7	6,1
435,425	57,1	42,8	33,2	27,0	16,9	11,4	6,2
435,415	65,0	51,0	39,0	31,6	18,7	11,4	6,4
435,405	67,4	53,1	41,1	32,7	20,2	13,1	7,3
435,395	72,5	54,3	41,7	33,5	20,3	15,1	7,2
435,385	61,7	46,7	35,8	28,9	18,0	13,2	6,0
435,375	58,4	43,4	32,5	26,1	16,0	11,6	5,3
435,365	54,3	40,7	30,6	24,1	14,6	9,7	4,6
435,355	60,0	44,2	33,9	26,7	15,8	10,2	5,5
435,345	68,1	51,7	40,0	31,6	19,4	12,5	7,3
435,335	61,6	48,0	37,1	31,7	20,0	13,1	8,4
435,325	53,7	43,9	34,8	29,8	19,3	14,4	8,3
435,315	62,0	50,5	39,4	32,4	20,0	13,1	6,4
435,305	59,1	45,8	35,8	29,5	19,3	12,6	7,6
435,295	61,3	45,7	35,4	28,4	17,9	13,4	7,0
435,285	62,0	46,4	35,7	28,4	17,1	11,1	6,1
435,275	63,5	48,6	38,1	30,7	19,2	13,1	6,3
435,265	51,3	41,0	32,3	26,1	16,0	10,3	5,5
435,255	52,0	40,6	31,8	25,3	15,4	10,9	5,7
Média	57,7	44,2	34,1	27,6	17,1	11,7	6,3
Desv. Padrão	6,69	5,28	4,18	3,48	2,24	1,74	1,04
Lim. Sup.	77,76	59,99	46,66	38,07	23,82	16,87	9,43
Lim. Inf.	37,64	28,31	21,56	17,19	10,40	6,45	3,21
BAKFAA	57,78	43,65	35,12	25,63	17,65	11,49	8,88



Camada	Módulo Calculado	Espessura (cm)
CBUQ SBS	2696	5,0
SAMI	1819	2,5
CBUQ Velho	1176	7,0
Infra. Reman.	106	-

Figura 121. Retroanálise Faixa 1 – Segmento 1.III

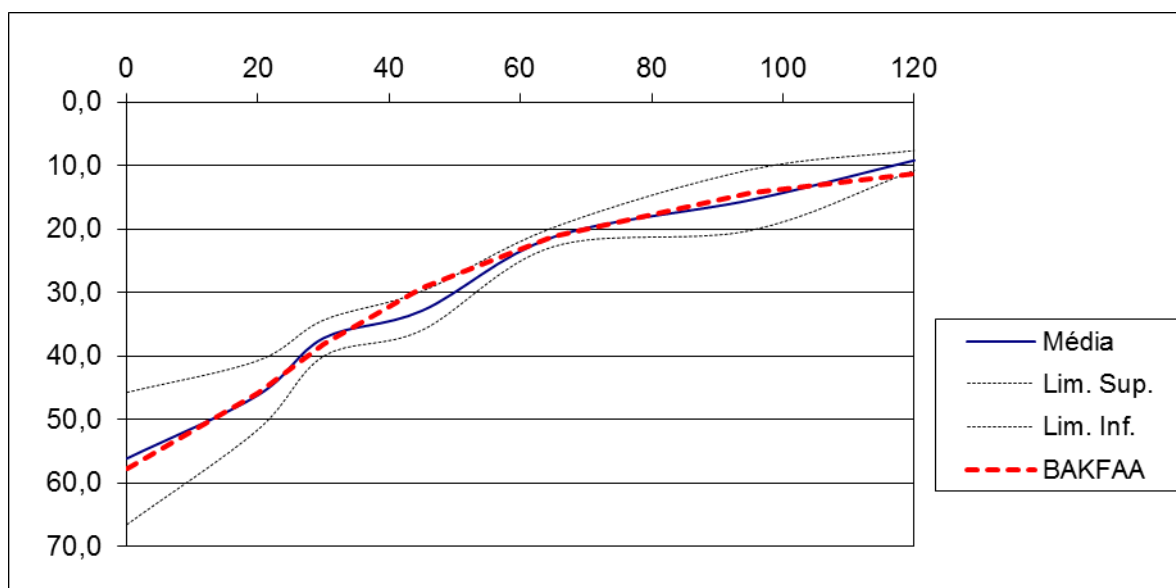
Km	VALORES DE DEFLEXÃO (0,01mm)						
	Df1	Df2	Df3	Df4	Df5	Df6	Df7
	0	20	30	45	65	95	120
435,245	56,7	42,5	32,6	25,8	15,2	11,3	5,3
435,235	55,5	41,0	31,2	24,2	14,2	9,3	5,7
435,225	52,1	41,2	31,7	25,8	15,7	11,4	7,8
435,215	59,9	45,2	34,8	28,7	17,6	14,0	7,8
435,205	52,2	39,3	29,6	24,0	14,8	10,4	6,8
435,195	57,4	42,3	31,4	25,2	14,9	11,0	6,9
435,185	56,4	41,6	31,6	25,2	15,9	12,1	7,0
435,175	50,8	39,1	29,7	24,0	15,1	11,7	7,0
435,165	51,8	39,0	29,7	23,5	14,5	11,2	6,6
435,155	60,3	44,5	34,4	27,7	17,6	11,5	7,7
435,145	54,0	43,3	32,7	26,2	15,9	10,4	6,4
435,135	63,3	47,0	36,2	28,8	17,7	12,1	6,5
435,125	60,1	47,5	36,0	29,1	17,8	12,6	7,0
435,115	60,8	47,5	36,4	29,9	18,5	12,6	7,3
435,105	52,8	40,1	31,1	25,8	16,4	12,0	7,1
435,095	58,7	44,2	34,2	28,3	17,6	11,3	7,5
435,085	46,3	36,9	28,6	23,8	14,9	10,0	6,6
435,075	57,7	45,2	34,7	27,8	17,2	10,8	6,8
435,065	44,5	32,8	25,1	20,6	13,0	8,6	6,0
435,055	48,6	37,0	28,2	23,0	13,7	10,0	5,2
435,045	55,3	40,1	30,2	22,9	12,6	8,7	4,7
435,035	64,7	50,0	39,4	33,8	22,1	15,7	9,6
434,995	69,3	53,9	41,6	34,9	22,2	15,7	9,5
434,985	68,2	52,9	41,2	34,1	21,6	15,7	9,2
Média	56,6	43,1	33,0	26,8	16,5	11,7	7,0
Desv. Padrão	6,27	5,04	4,07	3,69	2,63	1,99	1,24
Lim. Sup.	75,37	58,21	45,24	37,87	24,41	17,63	10,71
Lim. Inf.	37,75	27,96	20,79	15,72	8,65	5,71	3,29
BAKFAA	56,74	42,57	34,16	25	17,31	11,31	8,73



Camada	Módulo Calculado	Espessura (cm)
CBUQ SBS	3176	5,0
SAMI	1950	2,5
RECICL. C/ EMULSAO	684	3,0
CBUQ Velho	1434	4,0
Infra. Reman.	108	-

Figura 122. Retroanálise Faixa 1 – Segmento 1.IV

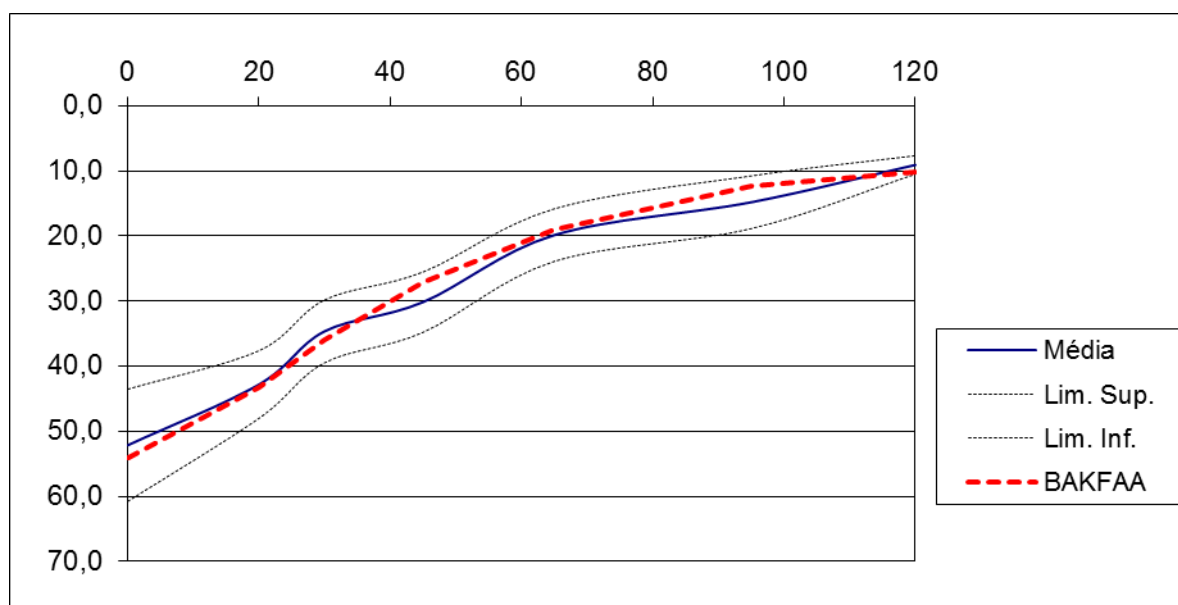
Km	VALORES DE DEFLEXÃO (0,01mm)						
	Df1	Df2	Df3	Df4	Df5	Df6	Df7
	0	20	30	45	65	95	120
434,975	58,5	47,5	37,0	33,6	20,7	13,1	8,4
434,965	58,8	47,6	38,4	33,7	21,9	15,6	9,6
434,955	55,8	45,5	37,0	32,3	21,1	16,8	9,4
434,945	51,3	43,8	36,1	31,6	21,1	16,0	9,1
Média	56,1	46,1	37,1	32,8	21,2	15,4	9,1
Desv. Padrão	3,47	1,81	0,95	1,02	0,50	1,60	0,53
Lim. Sup.	66,52	51,54	39,98	35,87	22,71	20,16	10,70
Lim. Inf.	45,68	40,66	34,28	29,73	19,69	10,59	7,55
BAKFAA	57,77	45,76	38,2	29,3	21,21	14,35	11,23



Camada	Módulo Calculado	Espessura (cm)	Módulo Laboratório
CBUQ SBS	3536	5,0	3446
SAMI	1875	2,5	
RECICL. C/ EMULSÃO	1585	7,0	
Infra. Reman.	812	-	

Figura 123. Retroanálise Faixa 1 – Segmento 1.V

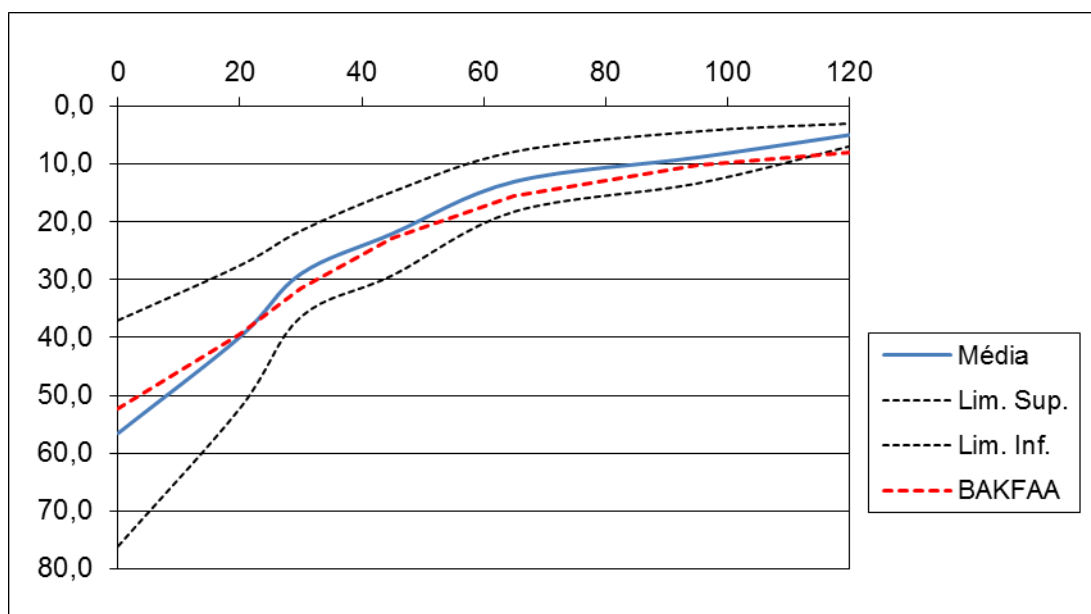
Km	VALORES DE DEFLEXÃO (0,01mm)						
	Df1	Df2	Df3	Df4	Df5	Df6	Df7
	0	20	30	45	65	95	120
434,925	47,8	41,1	33,8	29,6	19,4	15,1	8,9
434,915	52,8	43,3	35,3	30,7	20,5	16,3	9,4
434,905	51,7	43,7	35,7	31,2	21,1	15,1	9,4
434,895	55,8	44,9	36,1	31,5	20,5	14,9	9,3
434,885	52,5	40,9	32,2	27,7	17,7	12,6	8,3
Média	52,1	42,8	34,6	30,1	19,8	14,8	9,1
Desv. Padrão	2,87	1,73	1,61	1,54	1,34	1,35	0,47
Lim. Sup.	60,74	47,97	39,45	34,77	23,87	18,85	10,48
Lim. Inf.	43,50	37,59	29,79	25,51	15,81	10,75	7,64
BAKFAA	54,07	43,18	35,91	27,03	18,93	12,28	10,21



Camada	Módulo Calculado	Espessura (cm)	Módulo Laboratório
CBUQ SBS	3355	10,5	3293
RECICL. C/ EMULSÃO	1230	4,0	
Infra. Reman.	100	-	

Figura 124. Retroanálise Faixa 1 – Segmento 1.VI

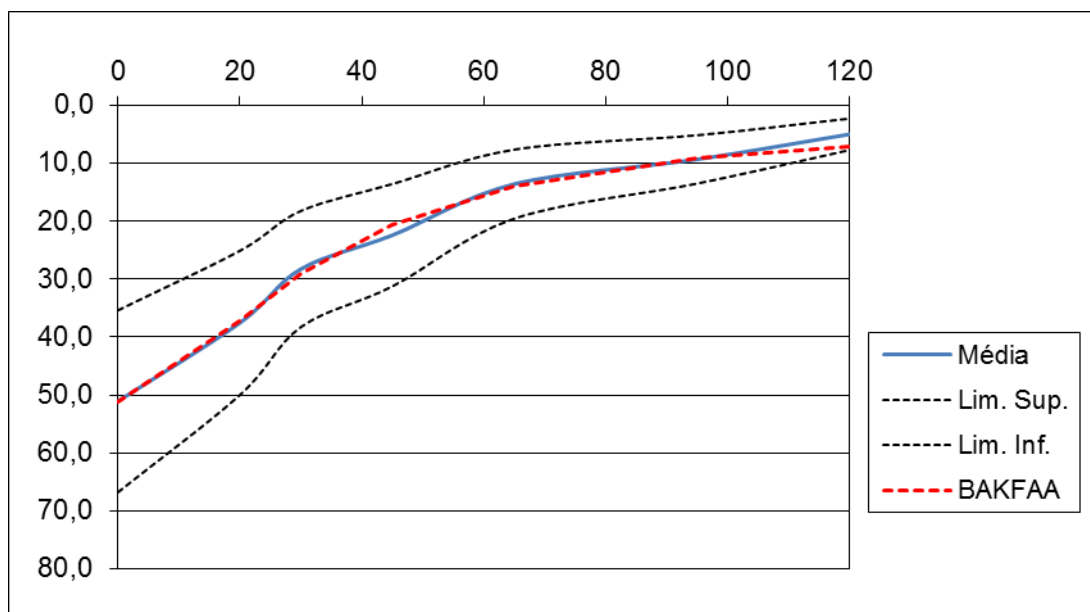
Km	VALORES DE DEFLEXÃO (0,01mm)						
	Df1	Df2	Df3	Df4	Df5	Df6	Df7
	0	20	30	45	65	95	120
435,590	55,4	39,5	28,4	21,1	11,9	7,4	4,6
435,580	56,8	40,5	30,0	24,3	14,8	10,7	5,5
435,570	66,3	44,6	29,8	19,6	11,1	7,1	4,5
435,560	62,9	44,7	32,8	25,5	15,1	9,6	6,0
435,550	54,9	39,8	29,7	23,5	14,6	10,6	5,4
435,540	53,1	37,0	27,0	20,9	12,4	8,9	4,6
435,530	46,4	33,0	25,0	19,3	11,4	7,7	4,2
Média	56,5	39,9	29,0	22,0	13,0	8,9	5,0
Desv. Padrão	6,51	4,12	2,48	2,41	1,73	1,50	0,66
Lim. Sup.	76,08	52,22	36,40	29,26	18,23	13,36	6,95
Lim. Inf.	37,01	27,52	21,52	14,80	7,86	4,35	2,99
BAKFAA	52,39	39,5	31,57	22,82	15,62	10,17	7,89



Camada	Módulo Calculado	Espessura (cm)	Módulo Laboratório
CBUQ SBS	3288	7,5	3413
CBUQ Velho	1022	7,0	
Infra. Reman.	119	-	

Figura 125. Retroanálise Faixa 1 – Segmento 2.I

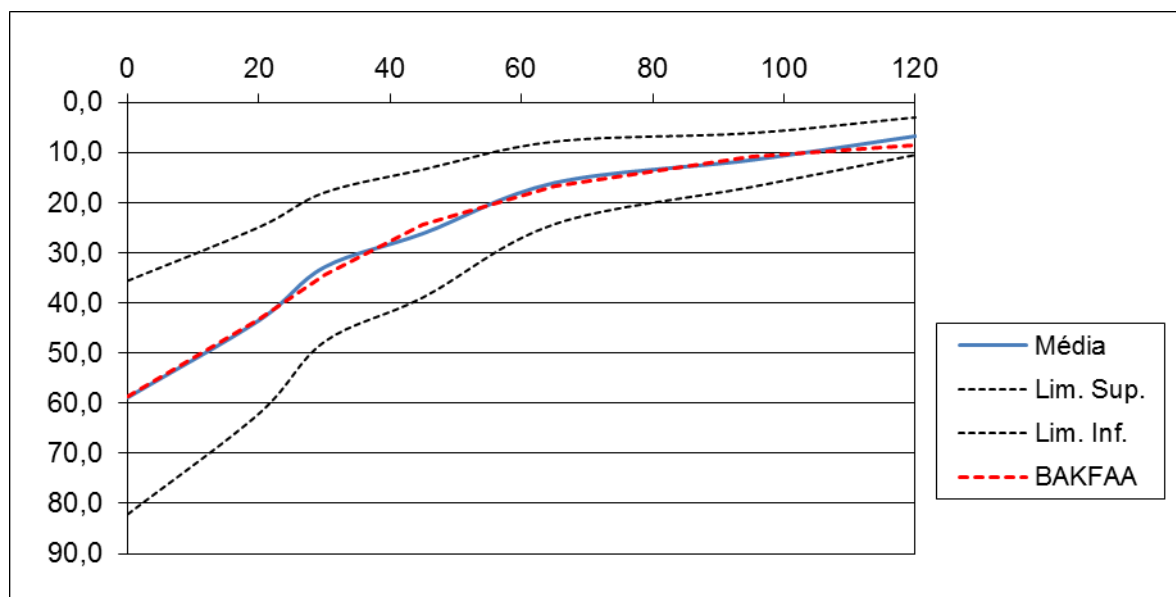
Km	VALORES DE DEFLEXÃO (0,01mm)						
	Df1	Df2	Df3	Df4	Df5	Df6	Df7
	0	20	30	45	65	95	120
435,510	56,3	39,6	29,9	23,0	14,0	9,5	4,6
435,500	47,7	34,9	25,8	20,2	11,8	8,0	4,3
435,490	47,5	33,9	24,8	18,9	10,9	7,4	3,8
435,480	47,4	33,5	25,1	19,5	11,4	8,4	3,9
435,470	52,2	36,7	27,4	21,3	12,9	9,2	4,7
435,460	53,7	37,7	27,0	20,8	12,8	10,2	6,0
435,450	46,0	32,6	24,8	20,1	12,1	8,5	5,2
435,440	44,2	32,3	24,6	19,9	12,2	9,2	4,4
435,430	44,6	33,7	25,9	20,0	12,1	7,7	3,7
435,420	46,9	35,8	27,2	21,9	13,4	8,3	4,5
435,410	49,7	35,4	25,6	19,9	12,0	8,5	4,9
435,400	50,7	36,5	27,7	22,0	13,1	9,7	5,0
435,390	51,6	37,2	26,8	20,7	12,4	8,4	4,7
435,380	45,6	33,4	25,1	19,9	11,9	8,7	4,0
435,370	39,2	29,5	22,4	18,0	11,0	7,9	4,3
435,360	48,0	36,4	27,7	21,5	13,1	9,0	4,9
435,350	53,6	39,2	29,5	23,8	14,2	9,0	5,1
435,340	49,6	36,9	28,1	22,7	14,3	9,1	5,1
435,330	58,6	42,2	32,1	26,7	16,8	10,5	6,6
435,320	59,9	44,5	33,9	27,3	16,6	11,0	6,5
435,310	52,7	40,9	31,1	25,8	16,6	12,1	6,8
435,300	58,6	44,6	34,7	28,6	18,0	12,8	6,5
435,290	57,4	45,0	34,7	27,4	16,5	11,9	6,1
435,280	56,1	42,1	31,6	25,3	15,2	10,0	5,3
435,270	54,7	41,3	31,1	24,8	14,9	9,2	4,9
435,260	55,1	39,9	29,5	22,6	13,1	8,1	4,2
Média	51,1	37,5	28,2	22,4	13,6	9,3	5,0
Desv. Padrão	5,24	4,15	3,34	2,94	1,99	1,39	0,91
Lim. Sup.	66,77	49,98	38,26	31,24	19,55	13,50	7,72
Lim. Inf.	35,36	25,08	18,21	13,58	7,63	5,14	2,28
BAKFAA	51,12	37,17	29,07	20,63	14,03	9,19	7,16



Camada	Módulo Calculado	Espessura (cm)	Módulo Laboratório
CBUQ SBS	3278	5,0	3319
SAMI	1860	2,5	
CBUQ Velho	887	7,0	
Infra. Reman.	131	-	

Figura 126. Retroanálise Faixa 1 – Segmento 2.II

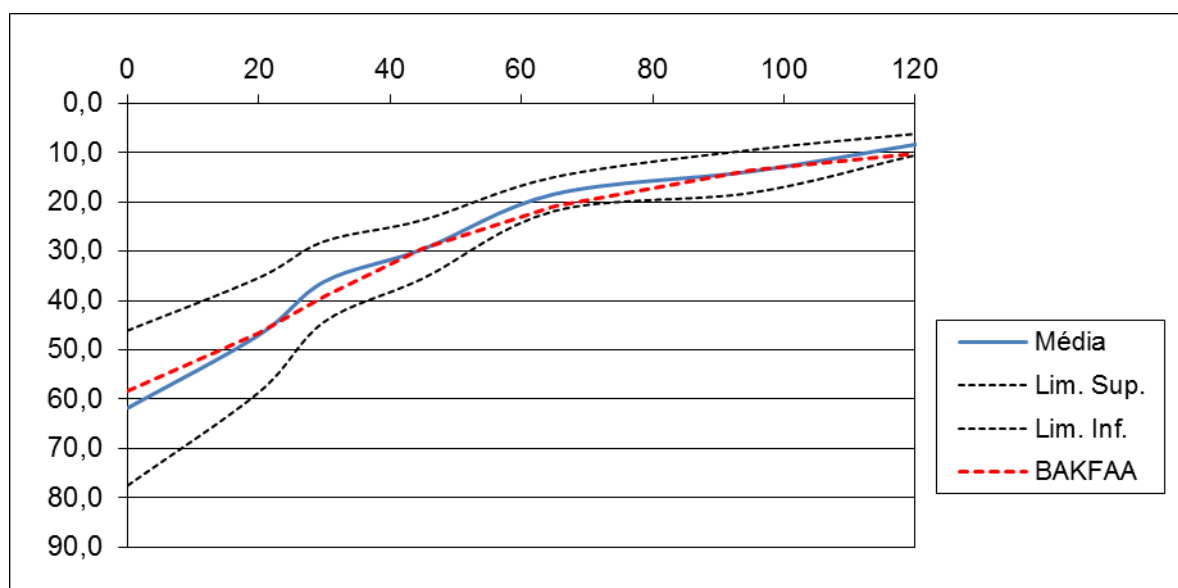
Km	VALORES DE DEFLEXÃO (0,01mm)						
	Df1	Df2	Df3	Df4	Df5	Df6	Df7
	0	20	30	45	65	95	120
435,240	46,8	36,0	27,3	21,9	13,7	9,8	5,3
435,230	54,4	41,4	31,7	25,5	15,8	11,4	6,7
435,220	51,6	37,5	28,3	23,0	15,1	12,0	6,9
435,210	54,3	40,9	30,2	24,4	15,8	10,6	6,1
435,200	53,4	39,8	30,2	23,2	13,7	10,1	5,0
435,190	59,5	44,2	33,0	25,9	15,7	10,5	6,2
435,180	57,1	40,3	29,8	22,9	14,3	11,2	6,3
435,170	51,0	36,0	27,0	21,9	13,2	9,2	5,7
435,160	47,9	36,3	27,6	22,7	14,9	11,5	7,4
435,150	53,9	39,0	29,4	23,5	15,4	11,0	7,3
435,140	53,3	39,7	30,3	24,8	14,6	11,7	7,3
435,130	65,8	45,9	33,9	25,6	13,9	10,4	5,1
435,120	63,9	46,1	34,7	26,3	14,8	9,4	4,5
435,110	69,9	51,7	39,1	30,7	18,7	12,2	6,8
435,100	61,4	44,6	33,7	26,1	16,0	11,2	6,4
435,090	55,4	39,9	30,2	23,0	13,1	9,7	5,4
435,080	55,2	38,9	28,5	21,7	12,7	9,2	5,6
435,070	54,5	38,8	28,1	22,2	13,7	10,3	6,0
435,060	54,3	40,3	30,8	24,3	15,2	11,4	6,9
435,050	70,2	54,4	42,3	34,5	21,7	16,3	8,7
435,040	64,8	49,5	37,5	31,4	19,6	12,4	8,0
435,030	69,1	51,5	40,0	32,7	20,5	15,1	8,8
435,000	71,3	54,4	42,0	34,0	21,0	13,5	8,3
434,990	72,6	54,9	41,0	33,6	20,3	13,7	8,8
Média	58,8	43,4	32,8	26,1	16,0	11,4	6,6
Desv. Padrão	7,77	6,20	4,96	4,26	2,75	1,80	1,25
Lim. Sup.	82,13	62,03	47,65	38,84	24,21	16,80	10,39
Lim. Inf.	35,50	24,80	17,90	13,31	7,74	6,02	2,90
BAKFAA	58,53	43,29	34,2	24,44	16,63	10,85	8,45



Camada	Módulo Calculado	Espessura (cm)	Módulo Laboratório
CBUQ SBS	2732	5,0	3310
SAMI	1725	2,5	
RECICL. C/ EMULSAO	1210	3,0	
CBUQ Velho	735	4,0	
Infra. Reman.	111	-	

Figura 127. Retroanálise Faixa 1 – Segmento 2.III

Km	VALORES DE DEFLEXÃO (0,01mm)						
	Df1	Df2	Df3	Df4	Df5	Df6	Df7
	0	20	30	45	65	95	120
434,970	60,5	45,6	35,4	29,7	19,0	12,8	8,6
434,960	61,1	44,9	34,5	28,4	17,8	11,4	6,8
434,950	65,4	50,8	39,4	32,3	20,3	15,8	8,9
434,940	59,0	44,7	34,8	27,9	17,3	13,6	7,9
434,930	50,6	39,0	30,4	25,6	16,3	12,5	8,0
434,920	65,4	49,3	37,7	30,8	18,8	15,1	8,9
434,910	60,3	47,3	36,5	30,2	19,0	15,4	9,2
434,900	65,3	50,6	38,1	30,6	18,4	13,7	8,5
434,890	68,4	50,4	38,1	30,5	18,6	13,8	8,2
Média	61,8	47,0	36,1	29,6	18,4	13,8	8,3
Desv. Padrão	5,24	3,87	2,71	1,98	1,15	1,45	0,72
Lim. Sup.	77,49	58,57	44,24	35,48	21,83	18,13	10,50
Lim. Inf.	46,07	35,34	27,96	23,63	14,95	9,45	6,17
BAKFAA	58,42	46,75	39	29,48	20,73	13,46	10,3



Camada	Módulo Calculado	Espessura (cm)	Módulo Laboratório
CBUQ SBS	2943	10,5	2856
RECLIC. C/ EMULSÃO	1382	4,0	
Infra. Reman.	92	-	

Figura 128. Retroanálise Faixa 1 – Segmento 2.IV