



Campus de São Carlos

*ESTUDO DO ENVELHECIMENTO A CURTO PRAZO DE
MISTURAS ASFÁLTICAS DENSAS COM CIMENTOS
ASFÁLTICOS MODIFICADOS*

PAULO CESAR LOPES LEMES

ORIENTADOR: PROF. ASSOC. MANOEL HENRIQUE ALBA SÓRIA

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO



**ESCOLA DE ENGENHARIA
DE SÃO CARLOS**

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
DEPARTAMENTO DE TRANSPORTES

**ESTUDO DO ENVELHECIMENTO A CURTO
PRAZO DE MISTURAS ASFÁLTICAS DENSAS
COM CIMENTOS ASFÁLTICOS MODIFICADOS**

Serviço de Pós-Graduação EESC/USP

EXEMPLAR REVISADO

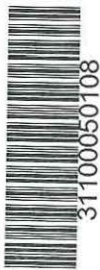
Data de entrada no Serviço... 04 / 01 / 05

Ass.: *Paulo Cesar*

Paulo Cesar Lopes Lemes

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, Área de Concentração: Transportes.

DEDALUS - Acervo - EESC



31100050108

ORIENTADOR: Prof. Manoel Henrique Alba Sória



São Carlos

2004

Class.	TESE EESC ✓
Cutt.	13298
Tombo	T008/05
Syno	142,2532

Ficha catalográfica preparada pela Seção de
Tratamento
da Informação do Serviço de Biblioteca – EESC/USP

L57e Lemes, Paulo César Lopes
Estudo do envelhecimento a curto prazo de misturas
asfálticas densas com cimentos asfálticos modificados /
Paulo César Lopes Lemes. -- São Carlos, 2004.


Dissertação (Mestrado) -- Escola de Engenharia de São
Carlos-Universidade de São Paulo, 2004.
Área: Engenharia de Transportes.
Orientador: Prof. Dr. Manoel H. A. Sória.

1. Pavimento 2. Asfalto. 3. Asfalto-polímero. 4.
Asfalto-borracha. 5. Misturas asfálticas. 6.
Envelhecimento. I. Título

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Engenheiro **PAULO CESAR LOPES LEMES**

Dissertação defendida e julgada em 29-10-2004 perante a Comissão Julgadora:



Prof. Associado **MANOEL HENRIQUE ALBA SÓRIA (Orientador)**
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP) Aprovado



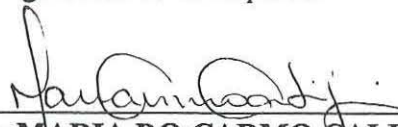
Prof. Dr. **GLAUCO TULIO PESSA FABBRI**
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP) Aprovado



Prof. Associada **LIEDI LEQI BARIANI BERNUCCI**
(Escola Politécnica/USP) aprovado



Prof. Assoc. **JOSÉ LEOMAR FERNANDES JUNIOR**
Coordenador do Programa de Pós-Graduação em
Engenharia de Transportes



Profª. Titular **MARIA DO CARMO CALIJURI**
Presidente da Comissão de Pós-Graduação da EESC

A meus pais e minha esposa Margarida,
pelo apoio compreensão e incentivo.

AGRADECIMENTOS

A Deus pela força espiritual, coragem, misericórdia, amor, conhecimento e motivação.

Ao Professor Associado Manoel Henrique Alba Sória, pela orientação, apoio, incentivo, paciência e confiança em mim depositada para conclusão deste trabalho.

Ao Professor Doutor Glauco Túlio Pessa Fabbri pela oportunidade e dicas valiosas dadas ao longo deste trabalho e apoio nas atividades de laboratório.

Aos Técnicos do laboratório de Estradas do Departamento de Transportes, Gigante, Paulo e João, pelo apoio e colaboração na execução dos ensaios laboratoriais.

Aos companheiros de trabalho André, Jisela e Gigante pela amizade, companheirismo e união no desenvolvimento dos trabalhos deste grupo de pesquisa.

Aos professores e funcionários do Departamento de Transportes da Escola de Engenharia de São Carlos.

Aos colegas e conselheiros Benedito Coutinho Neto e Adalberto Leandro Faxina, pelas orientações, dicas, informações e materiais de pesquisa.

Aos amigos Andrés Batista Cheung, Alexandre Kepler Soares e Johannes Gerson Jansen, pela amizade e incentivo.

A todos os colegas do Departamento de Transportes com quem convivi durante dois ótimos anos em um ambiente de amizade, brincadeiras, diversões e confraternizações.

À CAPES, pela concessão da bolsa de estudos para realização deste programa de mestrado.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	vi
LISTA DE TABELAS	viii
RESUMO	xii
ABSTRACT	xiii
CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO	1
1.1. Justificativa	2
1.2. Objetivos	2
1.3. Procedimento Experimental	3
CAPÍTULO 2: REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
2.1. Processo de envelhecimento do cimento asfáltico e seu efeito nas misturas asfálticas	5
2.1.1. Envelhecimento do cimento asfáltico por oxidação	7
2.1.2. Fatores que influenciam no processo de envelhecimento a curto prazo de uma mistura asfáltica	8
2.1.2.1. Espessura de película	8
2.1.2.2. Tipos de usinas	10
2.1.2.3. Temperatura de usinagem	10
2.1.2.4. Tempo de espalhamento e compactação	10
2.1.3. Fatores que influenciam no processo de envelhecimento a longo prazo de uma mistura asfáltica	11
2.1.3.1. Espessura de película	11
2.1.3.2. Volume de vazios	12
2.2. Cimentos Asfálticos Modificados	12
2.2.1. Propriedades dos cimentos asfálticos modificados	13
2.2.2. Cimentos asfálticos modificados com polímero	15
2.2.2.1. Classificação dos polímeros	16
2.2.2.2. Polímero SBS	17
2.2.3. Cimentos asfálticos modificado com borracha	18
2.2.4. O ligante asfalto-borracha	19
2.2.5. Aplicações do ligante asfalto-borracha	22
2.2.5.1. Selantes de trincas e juntas	22
2.2.5.2. SAM (<i>Stress Absorbing Membrane</i>)	23
2.2.5.3. SAMI (<i>Stress Absorbing Membrane Interlayer</i>)	23
2.2.5.4. Concreto asfáltico usinado a quente	24
2.4. Ensaio para Determinação de Propriedades Mecânicas das Misturas Asfálticas	24
2.4.1. Ensaio de fluência por compressão uniaxial dinâmica	24
2.4.2. Ensaio de resistência à tração por compressão diametral	26

2.4.3. Ensaio de módulo de resiliência por compressão diametral dinâmica	29
CAPÍTULO 3: MATERIAIS E MÉTODOS	31
3.1. Introdução	31
3.2. Materiais	32
3.2.1. Agregados minerais	32
3.2.2. Cimentos asfálticos.....	33
3.2.3. Misturas asfálticas	35
3.2.3.1. Dosagem.....	35
3.2.3.2. Temperatura de mistura e compactação	37
3.2.3.3. Moldagem dos corpos-de-prova.....	38
3.2.3.4. Ensaio Marshall.....	38
3.3. Métodos	40
3.3.1. Processo de envelhecimento a curto prazo	40
3.3.2. Método de ensaio Marshall	41
3.3.3. Ensaio de fluência por compressão uniaxial dinâmica.....	41
3.3.4. Ensaio de resistência à tração por compressão diametral.....	42
3.3.5. Ensaio de módulo de resiliência por compressão diametral dinâmica	44
CAPÍTULO 4: APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	46
4.1. Introdução	46
4.2. Ensaio Marshall	47
4.3. Ensaio de fluência por compressão uniaxial dinâmica	51
4.4. Ensaio de Resistência à Tração por Compressão Diametral.....	62
4.5. Ensaio de Módulo de Resiliência por Compressão Diametral.....	66
CAPÍTULO 5: CONCLUSÕES.....	77
5.1. Introdução	77
5.2. Ensaio Marshall	77
5.3. Ensaio de Fluência por Compressão Uniaxial Dinâmica.....	78
5.4. Ensaio de Resistência à Tração por Compressão Diametral.....	79
5.5. Ensaio de Módulo de Resiliência por Compressão Diametral Dinâmica	80
5.6. Conclusão Geral.....	81
5.7. Sugestões para Pesquisas Posteriores	82
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	83
BIBLIOGRAFIA CONSULTADA.....	90
ANEXOS.....	94

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1. Envelhecimento do cimento asfáltico nas etapas de construção e de utilização do pavimento (Adaptado de WHITEOAK, 1991).....	6
Figura 2.2. Envelhecimento durante a usinagem em função da espessura de película (Adaptado de WHITEOAK, 1991).	9
Figura 3.1. Faixa “C” DNER (1997) e distribuição granulométrica adotada.	32
Figura 3.2. Corpos-de-prova após serem desmoldados e parafinados.	39
Figura 3.3. Exemplo do posicionamento dos LVDT’s (180°).	42
Figura 4.1. Densidade aparente em função do teor de cimento asfáltico.....	48
Figura 4.2. Volume de vazios em função do teor de cimento asfáltico.	49
Figura 4.3. Relação betume-vazios em função do teor de cimento asfáltico.....	49
Figura 4.4. Fluência em função do teor de cimento asfáltico.	50
Figura 4.5. Estabilidade em função do teor de cimento asfáltico.	50
Figura 4.6. Deformação total média no ensaio de compressão uniaxial dinâmica para as misturas não envelhecidas.	52
Figura 4.7. Deformação total média no ensaio de compressão uniaxial dinâmica para as misturas envelhecidas a curto prazo por um período de 4 horas.	53
Figura 4.8. Deformação total média no ensaio de compressão uniaxial dinâmica para as misturas envelhecidas a curto prazo por um período de 8 horas.	53
Figura 4.9. Deformação total média no ensaio de compressão uniaxial dinâmica para as misturas moldadas com cimento asfáltico convencional submetidas ao envelhecimento a curto prazo.....	54
Figura 4.10. Deformação total média no ensaio de compressão uniaxial dinâmica para as misturas moldadas com cimento asfáltico modificado com polímero submetidas ao envelhecimento a curto prazo.....	54
Figura 4.11. Deformação total media do ensaio de compressão uniaxial dinâmica para as misturas moldadas com cimento asfáltico modificado com borracha submetidas ao envelhecimento a curto prazo.....	55
Figura 4.12. Inclinação média (taxa de deformação) no ensaio de compressão uniaxial dinâmica para as misturas não envelhecidas.	57
Figura 4.13. Inclinação média (taxa de deformação) no ensaio de compressão uniaxial dinâmica para as misturas envelhecidas a curto prazo por um período de 4 horas.	58
Figura 4.14. Inclinação média (taxa de deformação) no ensaio de compressão uniaxial dinâmica para as misturas envelhecidas a curto prazo por um período de 8 horas.	58
Figura 4.15. Inclinação média (taxa de deformação) no ensaio de compressão uniaxial dinâmica para as misturas moldadas com cimento asfáltico convencional submetidas ao envelhecimento a curto prazo.	59
Figura 4.16. Inclinação média (taxa de deformação) no ensaio de compressão uniaxial dinâmica para as misturas moldadas com cimento asfáltico modificado com polímero submetidas ao envelhecimento a curto prazo.	59

Figura 4.17. Inclinação média (taxa de deformação) no ensaio de compressão uniaxial dinâmica para as misturas moldadas com cimento asfáltico modificado com borracha submetidas ao envelhecimento a curto prazo.	60
Figura 4.18. Resistência à tração para as misturas asfálticas submetidas ao envelhecimento a curto prazo por um período de 0 horas.	63
Figura 4.19. Resistência à tração para as misturas asfálticas submetidas ao envelhecimento a curto prazo por um período de 4 horas.	64
Figura 4.20. Resistência à tração para as misturas asfálticas submetidas ao envelhecimento a curto prazo por um período de 8 horas.	64
Figura 4.21. Resistência à tração para as misturas asfálticas moldadas com cimento asfáltico convencional submetidas ao envelhecimento a curto prazo.	65
Figura 4.22. Resistência à tração para as misturas asfálticas moldadas com cimento asfáltico modificado com polímero submetidas ao envelhecimento a curto prazo.	65
Figura 4.23. Resistência à tração para as misturas asfálticas moldadas com cimento asfáltico modificado com borracha submetidas ao envelhecimento a curto prazo.	66
Figura 4.24. Módulo de resiliência para as misturas asfálticas submetidas ao envelhecimento a curto prazo por um período de 0 horas.	68
Figura 4.25. Módulo de resiliência para as misturas asfálticas submetidas ao envelhecimento a curto prazo por um período de 4 horas.	68
Figura 4.26. Módulo de resiliência para as misturas asfálticas submetidas ao envelhecimento a curto prazo por um período de 8 horas.	46
Figura 4.27. Módulo de resiliência para as misturas asfálticas moldadas com cimento asfáltico convencional submetidas ao envelhecimento a curto prazo. .	69
Figura 4.28. Módulo de resiliência para as misturas asfálticas moldadas com cimento asfáltico modificado com polímero submetidas ao envelhecimento a curto prazo.	70
Figura 4.29. Módulo de resiliência para as misturas asfálticas moldadas com cimento asfáltico modificado com borracha submetidas ao envelhecimento a curto prazo.	70
Figura 4.30. Efeito relativo dos fatores na deformação total do ensaio de fluência por compressão uniaxial dinâmica. Nível de significância 5%.	74
Figura 4.31. Efeito relativo dos fatores na deformação total do ensaio de fluência por compressão uniaxial dinâmica. Nível de significância 1%.	74
Figura 4.32. Efeito relativo dos fatores na inclinação média do ensaio de fluência por compressão uniaxial dinâmica. Nível de significância 5%.	75
Figura 4.33. Efeito relativo dos fatores na inclinação média do ensaio de fluência por compressão uniaxial dinâmica. Nível de significância 1%.	75
Figura 4.34. Efeito relativo dos fatores no módulo de resiliência do ensaio de tração por compressão diametral dinâmica. Nível de significância 5%.	76
Figura 4.35. Efeito relativo dos fatores no módulo de resiliência do ensaio de tração por compressão diametral dinâmica. Nível de significância 1%.	76

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1. Especificações para diferentes tipos de ligante asfalto-borracha (<i>BAKER RUBBER Inc.</i> , 1998).	21
Tabela 2.2. Propriedades físicas de ligantes asfalto-borracha (ASTM, 1997).	21
Tabela 3.1. Composição granulométrica faixa “C” DNER (1997).	33
Tabela 3.2. Ensaio de caracterização física dos agregados minerais.	33
Tabela 3.3. Resultados dos ensaios de caracterização física dos cimentos asfálticos. [Fonte: Asfaltos Continental].	34
Tabela 3.4. Especificações dos cimentos asfálticos para os ensaios realizados.	35
Tabela 3.5. Limites usados no método de ensaio Marshall para concreto asfáltico convencional.	36
Tabela 3.6. Limites usados no método de ensaio Marshall para concreto asfáltico modificado com polímero.	36
Tabela 4.1. Resultados do ensaio Marshall para a mistura de referência (CAP 20). 47	
Tabela 4.2. Resultados do ensaio Marshall para mistura modificada com polímero. 47	
Tabela 4.3. Resultados do ensaio Marshall para mistura modificada com borracha. 48	
Tabela 4.4. Teores ótimos para as três misturas asfálticas.	51
Tabela 4.5. Resultados médios de deformação total para as misturas submetidas ao processo de envelhecimento a curto prazo.	52
Tabela 4.6. Resultados médios de inclinação para as misturas submetidas ao processo de envelhecimento a curto prazo.	52
Tabela 4.7. Resultados da Análise de Variância para deformação total para um nível de significância 5%.	56
Tabela 4.8. Resultados da Análise de Variância para deformação total para um nível de significância 1%.	56
Tabela 4.9. Resultados da Análise de Variância para inclinação média no ensaio de compressão axial dinâmica para um nível de significância 5%.	61
Tabela 4.10. Resultados da Análise de Variância para inclinação média no ensaio de compressão axial dinâmica para um nível de significância 1%.	61
Tabela 4.11. Resultados do ensaio de tração indireta para as misturas não envelhecidas.	62
Tabela 4.12. Resultados do ensaio de tração indireta para as misturas envelhecidas por um período de 4 horas.	63
Tabela 4.13. Resultados do ensaio de tração indireta para as misturas envelhecidas por um período de 8 horas.	63
Tabela 4.14. Resultados do ensaio de módulo de resiliência para as misturas envelhecidas por 0 horas.	67
Tabela 4.15. Resultados do ensaio de módulo de resiliência para as misturas envelhecidas por 4 horas.	67
Tabela 4.16. Resultados do ensaio de módulo de resiliência para as misturas envelhecidas por 8 horas.	67
Tabela 4.17. Resultados da análise de variância para módulo de resiliência para um nível de significância 5%.	71

Tabela 4.18. Resultados da análise de variância para módulo de resiliência para um nível de significância 1%.	72
Tabela 4.19. Influência dos fatores nos resultados de ensaios.	73
Tabela A1. Resultados do ensaio de dosagem Marshall para as misturas moldadas com cimento asfáltico convencional.	95
Tabela A2. Resultados do ensaio de dosagem Marshall para as misturas moldadas com cimento asfáltico modificado com polímero.	96
Tabela A3. Resultados do ensaio de dosagem Marshall para as misturas moldadas com cimento asfáltico modificado com polímero.	97
Tabela B1. Resultados de deformação total do ensaio de fluência por compressão uniaxial dinâmica das misturas moldadas com cimento asfáltico convencional envelhecidas por um período de 0 horas.	98
Tabela B2. Resultados de deformação total do ensaio de fluência por compressão uniaxial dinâmica das misturas moldadas com cimento asfáltico modificado com polímero envelhecidas por um período de 0 horas.	99
Tabela B3. Resultados de deformação total do ensaio de fluência por compressão uniaxial dinâmica das misturas moldadas com cimento asfáltico modificado com borracha envelhecidas por um período de 0 horas.	100
Tabela B4. Resultados de deformação total do ensaio de fluência por compressão uniaxial dinâmica das misturas moldadas com cimento asfáltico convencional envelhecidas por um período de 4 horas.	101
Tabela B5. Resultados de deformação total do ensaio de fluência por compressão uniaxial dinâmica das misturas moldadas com cimento asfáltico modificado com polímero envelhecidas por um período de 4 horas.	102
Tabela B6. Resultados de deformação total do ensaio de fluência por compressão uniaxial dinâmica das misturas moldadas com cimento asfáltico modificado com borracha envelhecidas por um período de 8 horas.	103
Tabela B7. Resultados de deformação total do ensaio de fluência por compressão uniaxial dinâmica das misturas moldadas com cimento asfáltico convencional envelhecidas por um período de 8 horas.	104
Tabela B8. Resultados de deformação total do ensaio de fluência por compressão uniaxial dinâmica das misturas moldadas com cimento asfáltico modificado com polímero envelhecidas por um período de 8 horas.	105
Tabela B9. Resultados de deformação total do ensaio de fluência por compressão uniaxial dinâmica das misturas moldadas com cimento asfáltico modificado com borracha envelhecidas por um período de 8 horas.	106
Tabela C1. Resultados do ensaio de resistência à tração por compressão diametral para as misturas asfálticas envelhecidas por um período de 4 horas.	107
Tabela C2. Resultados do ensaio de resistência à tração por compressão diametral para as misturas asfálticas envelhecidas por um período de 8 horas.	107
Tabela D1. Resultados do ensaio de módulo de resiliência por compressão diametral dinâmica para as misturas asfálticas moldadas com cimento asfáltico convencional (teor 5,0%) envelhecidas por um período de 4 horas.	108
Tabela D2. Resultados do ensaio de módulo de resiliência por compressão diametral dinâmica para as misturas asfálticas moldadas com cimento asfáltico convencional (teor 5,5%) envelhecidas por um período de 4 horas.	109

Tabela D3. Resultados do ensaio de módulo de resiliência por compressão diametral dinâmica para as misturas asfálticas moldadas com cimento asfáltico convencional (teor 6,0%) envelhecidas por um período de 4 horas.	110
Tabela D4. Resultados do ensaio de módulo de resiliência por compressão diametral dinâmica para as misturas asfálticas moldadas com cimento asfáltico convencional (teor 6,5%) envelhecidas por um período de 4 horas.	111
Tabela D5. Resultados do ensaio de módulo de resiliência por compressão diametral dinâmica para as misturas asfálticas moldadas com cimento asfáltico modificado com polímero (teor 5,0%) envelhecidas por um período de 4 horas.	112
Tabela D6. Resultados do ensaio de módulo de resiliência por compressão diametral dinâmica para as misturas asfálticas moldadas com cimento asfáltico modificado com polímero (teor 5,5%) envelhecidas por um período de 4 horas.	113
Tabela D7. Resultados do ensaio de módulo de resiliência por compressão diametral dinâmica para as misturas asfálticas moldadas com cimento asfáltico modificado com polímero (teor 6,0%) envelhecidas por um período de 4 horas.	114
Tabela D8. Resultados do ensaio de módulo de resiliência por compressão diametral dinâmica para as misturas asfálticas moldadas com cimento asfáltico modificado com polímero (teor 6,5%) envelhecidas por um período de 4 horas.	115
Tabela D9. Resultados do ensaio de módulo de resiliência por compressão diametral dinâmica para as misturas asfálticas moldadas com cimento asfáltico modificado com borracha (teor 5,0%) envelhecidas por um período de 4 horas.	116
Tabela D10. Resultados do ensaio de módulo de resiliência por compressão diametral dinâmica para as misturas asfálticas moldadas com cimento asfáltico modificado com borracha (teor 5,5%) envelhecidas por um período de 4 horas.	117
Tabela D11. Resultados do ensaio de módulo de resiliência por compressão diametral dinâmica para as misturas asfálticas moldadas com cimento asfáltico modificado com borracha (6,0%) envelhecidas por um período de 4 horas. ...	118
Tabela D12. Resultados do ensaio de módulo de resiliência por compressão diametral dinâmica para as misturas asfálticas moldadas com cimento asfáltico modificado com borracha (6,5%) envelhecidas por um período de 4 horas. ...	119
Tabela D13. Resultados do ensaio de módulo de resiliência por compressão diametral dinâmica para as misturas asfálticas moldadas com cimento asfáltico convencional (teor 5,0%) envelhecidas por um período de 8 horas.	120
Tabela D14. Resultados do ensaio de módulo de resiliência por compressão diametral dinâmica para as misturas asfálticas moldadas com cimento asfáltico convencional (teor 5,5%) envelhecidas por um período de 8 horas.	121
Tabela D15. Resultados do ensaio de módulo de resiliência por compressão diametral dinâmica para as misturas asfálticas moldadas com cimento asfáltico convencional (teor 6,0%) envelhecidas por um período de 8 horas.	122
Tabela D16. Resultados do ensaio de módulo de resiliência por compressão diametral dinâmica para as misturas asfálticas moldadas com cimento asfáltico convencional (teor 6,5 %) envelhecidas por um período de 8 horas.	123

Tabela D17. Resultados do ensaio de módulo de resiliência por compressão diametral dinâmica para as misturas asfálticas moldadas com cimento asfáltico modificado com polímero (teor 5,0%) envelhecidas por um período de 8 horas.	124
Tabela D18. Resultados do ensaio de módulo de resiliência por compressão diametral dinâmica para as misturas asfálticas moldadas com cimento asfáltico modificado com polímero (teor 5,5%) envelhecidas por um período de 8 horas.	125
Tabela D19. Resultados do ensaio de módulo de resiliência por compressão diametral dinâmica para as misturas asfálticas moldadas com cimento asfáltico modificado com polímero (teor 6,0%) envelhecidas por um período de 8 horas.	126
Tabela D20. Resultados do ensaio de módulo de resiliência por compressão diametral dinâmica para as misturas asfálticas moldadas com cimento asfáltico modificado com polímero (teor 6,5%) envelhecidas por um período de 8 horas.	127
Tabela D21. Resultados do ensaio de módulo de resiliência por compressão diametral dinâmica para as misturas asfálticas moldadas com cimento asfáltico modificado com borracha (teor 5,0%) envelhecidas por um período de 8 horas.	128
Tabela D22. Resultados do ensaio de módulo de resiliência por compressão diametral dinâmica para as misturas asfálticas moldadas com cimento asfáltico modificado com borracha (teor 5,5%) envelhecidas por um período de 8 horas.	129
Tabela D23. Resultados do ensaio de módulo de resiliência por compressão diametral dinâmica para as misturas asfálticas moldadas com cimento asfáltico modificado com borracha (teor 6,0%) envelhecidas por um período de 8 horas.	130
Tabela D24. Resultados do ensaio de módulo de resiliência por compressão diametral dinâmica para as misturas asfálticas moldadas com cimento asfáltico modificado com borracha (teor 6,5%) envelhecidas por um período de 8 horas.	131

RESUMO

LEMES, P. C. L. (2004). *Estudo do envelhecimento a curto prazo de misturas asfálticas densas com cimento asfáltico modificado*. São Carlos, 2004. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

Este trabalho tem por objetivo avaliar o desempenho mecânico de misturas asfálticas densas quando submetidas ao processo de envelhecimento a curto prazo, em laboratório. Foram usados três tipos de cimento asfáltico: Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP 20 puro), cimento asfáltico modificado com 4,5% de polímero SBS (*Styrene Butadiene Styrene*) e cimento asfáltico modificado com 20,0% borracha reciclada de pneu (BRP). A curva granulométrica adotada é o centro da faixa “C” da especificação federal (DNER, 1997). Para simular o processo de envelhecimento a curto prazo durante as fases de estocagem, mistura, aplicação e construção, as misturas asfálticas foram acondicionadas de maneira solta em estufa de ventilação por um período de 4 e 8 horas, a uma temperatura de 135 °C. Após o envelhecimento as misturas foram compactadas de acordo com o método de ensaio Marshall e submetidas aos ensaios mecânicos. Os resultados de ensaio de fluência por compressão uniaxial dinâmica mostraram que, em relação aos asfaltos puros, as misturas modificadas apresentam deformação total menor, quando submetidas ao processo de envelhecimento a curto prazo. Os resultados do ensaio de módulo de resiliência não permitiram distinguir claramente a influência do processo de envelhecimento a curto prazo nas misturas asfálticas modificadas com borracha. Já para as misturas modificadas com polímero, o módulo de resiliência aumentou quando estas misturas foram submetidas ao processo de envelhecimento a curto prazo.

Palavras-chave: pavimento, asfalto, asfalto-borracha, asfalto-polímero, envelhecimento

ABSTRACT

LEMES, P. C. L. (2004). *Estudo do envelhecimento a curto prazo de misturas asfálticas densas com cimento asfáltico modificado*. São Carlos, 2004. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

The purpose of this research is to evaluate the modification of some mechanical properties of dense asphalt mixes due to short-term asphalt aging. Three type of binder were tested: CAP 20 asphalt cement (Petrol Asphalt Cement-20, Brazilian specification), SBS polymer-modified asphalt (Styrene Butadiene Styrene 4. 5% + CAP 20) and recycled tire rubber-modified asphalt (rubber 20% + CAP 20). The grain size distribution of the aggregate conforms to grade “C” of the Brazilian standard for bituminous concrete (DNER - Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, 1997). In order to simulate the aging phenomenon that occurs during asphalt storage, mixture production, placement and compaction, the specimens of loose mixture were placed over a tray in a ventilated oven at 135° C for 4 or 8 hours. After the aging period, if applicable, the mixture was compacted according to the Marshal method. Immediately after the compaction process the specimens were tested for uniaxial dynamic creep, tension by diametral compression, and resilience by dynamic diametral compression. Results of uniaxial dynamic creep test had shown that, after laboratory short-term aging, the total deformation accumulated by polymer or rubber modified mixtures are smaller than total deformation for plain asphalt. Resilient modulus tests, for rubber modified asphalts, were not conclusive about differences between mixtures before and after aging. However, for polymer modified asphalts, the resilient modulus increased as effect of short-term aging.

Keywords: pavement, asphalt, asphalt-polymer; asphalt-rubber; aging.

CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO

Uma das grandes preocupações na engenharia rodoviária refere-se aos mecanismos de deterioração do pavimento provocados, principalmente, pelo tráfego de veículos pesados associados às condições de intempéries. Entre os efeitos das solicitações destacam-se a deformação permanente e as trincas por fadiga. Ambos provocam perda funcional e, nas condições mais severas, perdas estruturais de monta, como deformação excessiva e deterioração com perda de material das camadas superficiais do pavimento.

A importância dos cimentos asfálticos para o desempenho dos pavimentos flexíveis tem levado ao uso de aditivos que melhorem as propriedades físicas, químicas e mecânicas visando aumento da resistência ao surgimento de defeitos. Com o objetivo de obter essas melhorias tem-se adicionado aos cimentos asfálticos polímeros como borracha de estireno butadieno (*Styrene Butadiene Rubber – SBR*), estireno butadieno estireno (*Styrene Butadiene Styrene – SBS*), acetato de vinil etileno (*Ethylene Vinyl Acetate – EVA*) e borracha moída de pneu.

O desempenho de pavimentos, construídos com cimentos asfálticos convencionais, e também, com cimentos asfálticos modificados, tem sido objeto de muitos estudos. Uma dessas linhas de estudo diz respeito ao envelhecimento dos cimentos asfálticos e, particularmente, das misturas asfálticas. Visa indicar, por meio de ensaios em laboratório, o comportamento em serviço dos pavimentos asfálticos ao longo do tempo.

1.1. Justificativa

O cimento asfáltico sofre um processo de envelhecimento durante sua vida em serviço, alterando as suas características químicas e físicas, em relação às propriedades originais e, conseqüentemente, tendo um comportamento em serviço diferente daquele apresentado em laboratório.

O envelhecimento de um cimento asfáltico é o processo pelo qual o ligante durante sua estocagem, produção, aplicação e vida em serviço tende a alterar suas propriedades químicas e reológicas resultando em um aumento na sua consistência. A alta temperatura e o grau de exposição do cimento asfáltico ao ar são os principais fatores que influenciam no envelhecimento do CAP a curto prazo.

O cimento asfáltico durante sua estocagem, produção, aplicação e compactação sofre um processo de envelhecimento inicial acelerado, denominado envelhecimento a curto prazo. Durante sua vida em serviço, o pavimento asfáltico sofre um processo de envelhecimento lento alterando suas características em relação às propriedades originais, este processo é denominado de envelhecimento a longo prazo.

O aumento do fluxo de tráfego pesado nas rodovias, assim como a pressão de enchimento dos pneus e a carga por eixo têm levado engenheiros e agências rodoviárias a investigar como as propriedades dos materiais de pavimentação asfáltica poderão ser melhoradas, com o propósito de desenvolver pavimentos com uma maior vida em serviço a menor custo. Modificadores, tais como: borrachas naturais e sintéticas (polímeros), vêm sendo adicionadas aos cimentos asfálticos com esta finalidade.

Estudar o envelhecimento de misturas empregando esses modificadores é uma maneira de identificar, por meio de ensaios laboratoriais, o comportamento dessas misturas durante sua estocagem, manuseio e aplicação e vida em serviço.

1.2. Objetivos

Esta pesquisa tem por objetivo estudar o comportamento mecânico de três misturas asfálticas densas: uma preparada com cimento asfáltico convencional (CAP 20 puro), outra preparada com cimento asfáltico modificado com polímero SBS (CAP 20 + 4,5% SBS) e uma terceira mistura preparada com cimento asfáltico modificado com borracha reciclada de pneu (CAP 20 + 20,0. Todas as misturas foram submetidas ao processo de envelhecimento a curto prazo em três períodos: zero horas, 4 horas e 8 horas.

1.3. Procedimento Experimental

Esse projeto de pesquisa de mestrado faz parte de um programa experimental, realizado em conjunto, que além dessa pesquisa, inclui mais duas pesquisas de mestrado e uma de doutorado.

Todas as pesquisas relacionam-se ao estudo dos fatores que influem o comportamento de misturas asfálticas densas. Estão sendo estudados seis tipos de misturas, resultantes da combinação de três tipos de cimento asfáltico (CAP 20 convencional, CAP 20 modificado com 4,5% de polímero SBS e CAP 20 modificado com 20% de borracha reciclada de pneu – BRP) e duas faixas granulométricas (centros das faixas “C” e “B” do DNER, 1997).

A presente pesquisa corresponde ao estudo de três misturas asfálticas, resultante dos três tipos de cimento asfáltico relacionados acima e do centro da faixa C DNER (1997). Para a realização desse estudo, as misturas serão submetidas ao processo de envelhecimento a curto prazo onde serão utilizados dois períodos de envelhecimento, quatro e oito horas.

Para cada mistura foi realizada uma dosagem Marshall, para a definição dos teores de asfalto nos quais a referida mistura terá seu comportamento analisado. Foram determinados cinco teores, dos quais quatro fazem parte desse estudo.

Como essa pesquisa de mestrado faz parte de um projeto experimental, foram realizadas em conjunto as etapas de preparação dos materiais a serem utilizados, que incluíram a coleta e peneiramento do agregado mineral; separação deste nos intervalos granulométricos especificados pelas curvas granulométricas adotadas

(DNER, 1997); lavagem do agregado, para a retirada do pó e impurezas, com posterior secagem em estufa; pesagem do agregado, previamente separado em peneiras, nas proporções adequadas para composição da curva granulométrica adotada e realização dos ensaios de dosagem Marshall. Também fez parte do trabalho em equipe a moldagem dos corpos-de-prova a serem utilizados na determinação das propriedades mecânicas das misturas asfálticas.

Após a fase anterior, serão realizados os ensaios de determinação das propriedades mecânicas das misturas asfálticas. Para esta pesquisa, serão realizados o ensaio de fluência por compressão uniaxial dinâmica, o ensaio de resistência à tração por compressão diametral e o ensaio de módulo de resiliência por compressão diametral dinâmica. Após a realização desses ensaios, será feita uma análise dos resultados através de um tratamento estatístico.

CAPÍTULO 2: REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Processo de envelhecimento do cimento asfáltico e seu efeito nas misturas asfálticas

Mudanças adversas na qualidade do revestimento asfáltico sobre um certo período são determinadas envelhecimento, essas mudanças, eventualmente, pode levar a uma deterioração precoce do pavimento. O envelhecimento de um cimento asfáltico é o processo pelo qual o cimento asfáltico, durante sua estocagem, manuseio, aplicação e serviço, sofre uma alteração em suas características químicas e reológicas, resultando no aumento em sua consistência.

Este processo ocorre quando as propriedades do cimento asfáltico originalmente especificadas mudam com o baixo rendimento do desempenho do pavimento asfáltico, sendo manifestado pelo endurecimento do cimento asfáltico indicado pela sua diminuição da penetração.

O envelhecimento inicial do cimento asfáltico tem início na usina, na qual o agregado é aquecido e misturado ao material betuminoso em temperaturas elevadas. Durante o curto período de mistura, o cimento asfáltico é exposto ao oxigênio do ar em películas muito finas espalhado sobre a grande área de superfície do agregado.

Os principais fatores que influenciam no envelhecimento do cimento asfáltico a curto prazo, considerando o tempo de estocagem, manuseio e aplicação são a

temperatura e o grau de exposição ao oxigênio do ar. Desta forma, quanto maior a superfície específica e a temperatura do cimento asfáltico, maior seu grau de oxidação. A temperaturas relativamente baixas, como as que ocorrem no pavimento, os asfaltos apresentam envelhecimento relativamente lento; no entanto, em temperaturas elevadas, como durante o processo de usinagem, manuseio e aplicação antes da compactação, o cimento asfáltico apresenta um envelhecimento acelerado. A viscosidade original do cimento asfáltico pode ser multiplicada por fatores tão grandes quanto dois ou quatro, num intervalo de tempo inferior a duas horas.

A figura 2.1 apresenta valores típicos de envelhecimento do cimento asfáltico nas diversas etapas de construção e utilização de um pavimento, segundo WHITEOAK (1991), onde o índice de envelhecimento é expresso pela relação entre a viscosidade após o envelhecimento em cada instante (η_a) e a viscosidade original do cimento asfáltico (η_0).

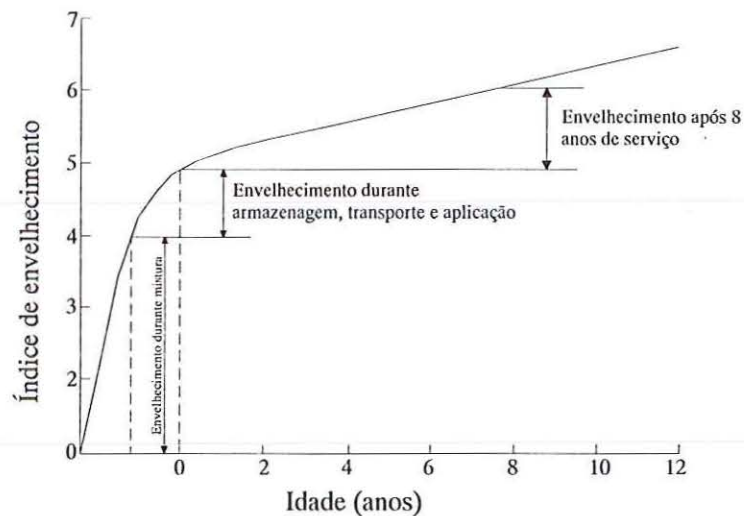


Figura 2.1. Envelhecimento do cimento asfáltico nas etapas de construção e de utilização do pavimento (Adaptado de WHITEOAK, 1991).

2.1.1. Envelhecimento do cimento asfáltico por oxidação

Como muitas substâncias orgânicas, o cimento asfáltico sofre um processo de oxidação quando em contato com o oxigênio do ar. A oxidação ocorre pela reação das moléculas de cimento asfáltico com o oxigênio do ar aumentando a viscosidade devido ao aumento das forças de interação molecular, uma vez que, possui natureza polar. Embora o aumento da viscosidade esteja relacionado a quantidade de oxidação ocorrida, a resposta do cimento asfáltico em termos de mudança de viscosidade depende também da origem ou composição do cimento asfáltico.

Segundo PETERSEN (1990), as mudanças nas propriedades físicas em relação à oxidação parecem ser governadas pelo estado de dispersão dos componentes do cimento asfáltico, ou seja, parecem depender da capacidade da fase solvente do cimento asfáltico em manter os componentes polares dispersos durante a oxidação, desta forma, reduzindo seu efeito no aumento da viscosidade.

No processo de envelhecimento a baixas temperaturas, ou seja, em temperaturas de serviço do pavimento, conforme as moléculas mais reativas se oxidam e se tornam polares, mais rapidamente se imobilizam em virtude da aglomeração, decorrente da baixa energia térmica do sistema. Conseqüentemente a capacidade das moléculas reagirem com o oxigênio do ar torna-se altamente reduzida, ocorrendo uma diminuição na taxa de aumento da viscosidade conforme aumenta o tempo de envelhecimento.

Por outro lado, no processo de envelhecimento em altas temperaturas as moléculas mais reativas, mesmo as oxidadas, não se imobilizam devido a alta energia térmica do sistema. Desassociadas essas moléculas continuam produzindo oxidação levando ao aumento da viscosidade com o tempo de oxidação, em condições de temperaturas elevadas a uma relação praticamente linear.

Segundo PETERSEN et. Al. (1993), o processo de envelhecimento do cimento asfáltico depende da temperatura máxima de serviço do pavimento (função do clima da região), principalmente quando forem utilizados cimentos asfálticos cuja fase solvente possua baixa capacidade de dispersão. Em baixas temperaturas as moléculas se encontram imobilizadas devido ao alto grau de associação molecular, o que

fisicamente dificulta a oxidação. Por outro lado, em altas temperaturas as moléculas adquirem mobilidade tornando possível a ocorrência de oxidação.

2.1.2. Fatores que influenciam no processo de envelhecimento a curto prazo de uma mistura asfáltica

2.1.2.1. Espessura de película

A espessura de película é um dos principais fatores que afetam o envelhecimento a curto prazo de uma mistura asfáltica, expondo o cimento asfáltico a uma maior ou menor exposição ao ar. Segundo WHITEOAK (1991), durante o processo de mistura todo agregado é revestido por uma fina película de cimento asfáltico, usualmente entre 5 a 15 micrômetros. Se toda a superfície do agregado pudesse ser esparramada em uma única superfície plana contínua, uma única tonelada de mistura asfáltica produziria uma espessura de película de aproximadamente 10.000 m² em área. Desta forma, quando o cimento asfáltico for misturado com o agregado, a alta temperatura e esparramado em finas películas, está altamente favorável à oxidação e perda de voláteis. Na figura 2.2 pode ser visto valores típicos de envelhecimento que ocorrem durante a usinagem em função da espessura de película.

Através da figura 2.2 observa-se a tendência em ocorrer maior índice de envelhecimento a curto prazo durante mistura, armazenagem e transporte para as misturas asfálticas que apresentam a menor espessura de película.

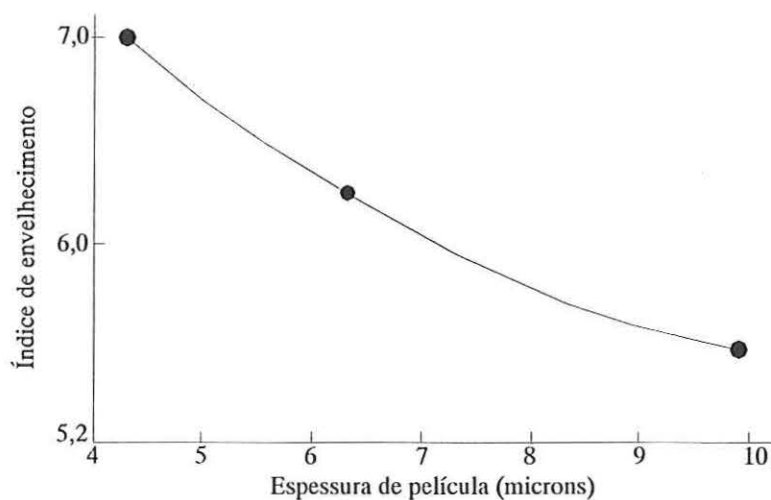


Figura 2.2. Envelhecimento durante a usinagem em função da espessura de película (Adaptado de WHITEOAK, 1991).

KANDHAL & CHAKRABORTY (1996) realizaram um estudo simulando em laboratório o envelhecimento a curto prazo de misturas asfálticas, variando a espessura de película do cimento asfáltico. Após o preparo das misturas, as mesmas foram submetidas ao processo de envelhecimento a curto prazo em estufa ventilada por um período de 4 horas a uma temperatura de 135 °C.

Após o processo de envelhecimento KANDHAL & CHAKRABORTY (1996) prepararam corpos-de-prova com 8% de vazios que foram compactados para cada tipo de mistura e o módulo de resiliência por compressão diametral a 25 °C foi determinado para todos os corpos-de-prova. Com isso, os autores concluíram que uma espessura de película entre 9 a 10 μm é indicada, abaixo das quais, a mistura é envelhecida a uma taxa acelerada, tanto para relações entre espessura de película e propriedades das misturas asfálticas envelhecidas (como módulo de resiliência e resistência à tração), quanto para relações entre espessura de película e propriedades dos cimentos asfálticos envelhecidos (como viscosidade, penetração e módulo complexo).

2.1.2.2. Tipos de usinas

Segundo WHITEOAK (1991), o envelhecimento durante o processo de estocagem, manuseio e aplicação, à mesma temperatura, em usinas do tipo “*drum mixer*”, se encontra na faixa de 5 a 15% com relação à penetração e de 4 °C com relação ao ponto de amolecimento do que em usinas de batelada. Este resultado é atribuído ao menor tempo de mistura do asfalto/agregado e a presença de vapor d’água no tambor de secagem e mistura da usina “*drum mixer*”, reduzindo, assim, a disponibilidade de oxigênio no ambiente para oxidação.

2.1.2.3. Temperatura de usinagem

Durante o processo de mistura o cimento asfáltico deve ser capaz de recobrir o agregado mineral seco e aquecido em um intervalo de tempo relativamente curto, aproximadamente 30 a 90 segundos, determinando a temperatura mínima de mistura. Durante esse intervalo de tempo, a temperatura de mistura deverá ser suficientemente alta, para permitir a rápida distribuição do cimento asfáltico sobre o agregado, o uso de um tempo mínimo de mistura e uma menor temperatura é desejável. O autor mostrou que um aumento de 5,5 °C na temperatura de mistura, para um tempo de mistura padrão de 30 segundos, resulta em um aumento de 1 °C no ponto de amolecimento do cimento asfáltico (WHITEOAK, 1991).

2.1.2.4. Tempo de espalhamento e compactação

Durante o espalhamento da massa asfáltica e antes da compactação, a mesma se apresenta com uma grande superfície específica exposta ao ar. Portanto, ocorrendo uma demora na compactação da massa, principalmente em condições climáticas de altas temperaturas e sem vento, provocando um envelhecimento acelerado uma vez que o tempo de esfriamento da massa será maior. Em condições climáticas de baixa temperatura e com vento, o esfriamento da massa será rápido, evitando o envelhecimento mais acelerado a curto prazo, levando, então, a uma dificuldade na

compactação que por sua vez resultará em uma massa asfáltica com elevado teor de vazios e como consequência um envelhecimento a longo prazo mais acelerado. Em temperaturas baixas, a demora em executar a compactação pode levar a massa asfáltica a um grau de compactação tão baixo, que os agregados poderão soltar-se do revestimento pela ação do tráfego, assim que o mesmo for liberado.

2.1.3. Fatores que influenciam no processo de envelhecimento a longo prazo de uma mistura asfáltica

O processo de envelhecimento a longo prazo de uma mistura asfáltica se dá após a conclusão do pavimento, mas de uma forma mais lenta, porém não cessa. O envelhecimento do cimento asfáltico em serviço é influenciado por características das misturas, dentre as quais destacamos a espessura de película e o teor de vazios.

2.1.3.1. Espessura de película

Como visto anteriormente, a espessura de película de cimento asfáltico sobre o agregado é fundamental para a determinação do envelhecimento a curto prazo e pode tornar-se importante também para o envelhecimento a longo prazo em massas asfálticas com alto teor de vazios.

KANDHAL & CHAKRABORTY (1996) em trabalho já citado, também fizeram correlações de espessura de película do cimento asfáltico com envelhecimento a longo prazo simulado em laboratório. Foram moldados corpos-de-prova em varias espessuras de película com um teor de vazios de 8%, com base na mistura asfáltica envelhecida a curto prazo, após moldagem os corpos-de-prova foram levados a uma estufa ventilada por um período de 120 horas (5 dias) à um temperatura de 85 °C. Este procedimento foi concebido para simular o envelhecimento em serviço de um pavimento asfáltico, correspondente a um período de cinco a dez anos.

KANDHAL & CHAKRABORTY (1996) também concluíram para o envelhecimento a longo prazo, que uma espessura de película entre 9 e 10 μm é

indicada, para amostras compactadas com teor de vazios de 8%, entretanto, para valores abaixo a mistura sofre um envelhecimento mais acelerado.

2.1.3.2. Volume de vazios

O volume de vazios proporciona um maior ou menor contato do oxigênio do ar com cimento asfáltico de uma mistura. Ele depende da curva granulométrica, da forma do agregado, do teor de cimento asfáltico e do grau de compactação de uma mistura asfáltica. Assim, quanto maior o volume de vazios maior a taxa de envelhecimento da mistura asfáltica, resultando em um endurecimento mais acelerado do cimento asfáltico.

Em estudos de envelhecimento de seções experimentais de rodovias do Texas, MARTIN et al. (1990) estabeleceram que o volume de vazios é um, senão, o maior fator que afeta a taxa de endurecimento de um pavimento asfáltico. O efeito do volume de vazios parece ser incontestável, mas dados indicam que quanto maior o volume de vazios, mais crítico é a qualidade dos asfaltos.

2.2. Cimentos Asfálticos Modificados

Tentativas em combinar materiais betuminosos com polímeros para melhorar o seu desempenho não são recentes. A primeira patente para combinação de asfalto com borracha natural para impermeabilização foi concedida a T. Hancock em 1823 (ISACSSON & LU, 1995 e ZANZOTTO & KENNEPHOL, 1996). Contudo, a primeira patente de uma mistura asfáltica com borracha natural para construção de estradas foi concedida a E. E. Cassell em 1844. As aplicações práticas de asfaltos modificados começaram em 1901, quando a *Société du Pavage em Asphalt Caoutchoute* foi estabelecida na França. Todavia, a primeira estrada utilizando asfalto modificado com borracha foi construída em Cannes em 1902. Todas as modificações antes da Segunda Guerra Mundial foram realizadas com borracha natural, que era o material disponível na época (ZANZOTTO & KENNEPOHL, 1996).

A adição de borracha natural ao asfalto foi iniciado por volta de 1840. Por vários anos, engenheiros e químicos têm trabalhado para misturar borracha natural (látex) e borracha sintética (polímero) em ligantes asfálticos para aumentar suas propriedades elásticas. A borracha de pneu descartado, um composto de borracha natural e sintética, é um material disponível que tem sido incluído nesse esforço (HEITZMAN, 1992).

Segundo o mesmo autor, no início da década de 60, Charles McDonald, engenheiro de materiais da cidade de Phoenix, começou a trabalhar com uma companhia local de asfalto para desenvolver um remendo de superfície, altamente elástico, usando cimento asfáltico modificado com borracha. Em 1968, o Departamento de Transporte do Arizona (*ADOT*) colocou seu primeiro tratamento superficial conhecido como *SAM* (*stress absorbing membrane*) usando um cimento asfáltico modificado com borracha, em 1972 o *ADOT* colocou seu primeiro *SAMI* (*stress absorbing membrane interlayer*) e em 1975 usou cimento asfáltico modificado com borracha em concreto asfáltico.

O uso de modificadores com o intuito de melhorar as propriedades do ligante em misturas asfálticas tem aumentado a cada ano. Asfaltos modificados têm sido usados para melhorar o desempenho dos pavimentos, aumentando a resistência a formação de trilhas de roda e ao aparecimento de trincas por fadiga e de origem térmica, retardando o envelhecimento e melhorando a adesividade (LING et al., 1997).

2.2.1. Propriedades dos cimentos asfálticos modificados

Para a modificação dos cimentos asfálticos ser bem sucedida elas deverão ser concebidas para melhorar uma ou mais propriedades básicas da massa asfáltica, relacionada a um ou mais tipos de defeitos. Segundo BAHIA (1995) essas propriedades podem ser classificadas em quatro tipos principais:

rigidez – em altas temperaturas ou baixas velocidades de carregamentos, uma maior rigidez é favorável para resistir a formação de trilhas de roda, enquanto, uma menor rigidez é favorável em temperaturas intermediárias e baixas para resistir a fadiga e trincas de origem térmica;

elasticidade – uma maior elasticidade é favorável para resistir a formação de trilhas de roda e fadiga. Uma menor elasticidade e uma maior capacidade de relaxar tensão pela fluência são favoráveis à resistência a trincas térmicas;

fragilidade – para melhorar a resistência à fadiga e trincas térmicas, a fragilidade deverá ser reduzida, aumentando a tolerância de deformação ou ductilidade;

durabilidade – envelhecimento oxidativo, endurecimento físico, e volatilização são as principais propriedades da durabilidade, capacidade de resistir a todas essas mudanças é favorável.

O cimento asfáltico modificado ideal deverá aumentar a coesão e baixar a susceptibilidade térmica para a faixa de temperatura que será submetido em serviço, além de apresentar baixa viscosidade em temperatura ambiente. Sua susceptibilidade ao tempo de carregamento deverá ser baixa, ao passo que, sua resistência à deformação, sua resistência a trincas térmicas e características de fadiga devem ser altas, ao mesmo tempo, deverá manter a mesma qualidade de adesão dos asfaltos convencionais (BRÛLÉ, 1996).

A adição de polímero tem por objetivo a melhoria de algumas propriedades do cimento asfáltico. Segundo TAYEBALI et al. (1992), as propriedades dos cimentos asfálticos, importantes para o uso como materiais de pavimentação, são durabilidade, adesividade e reologia. A presença de modificadores altera o comportamento visco-elástico, de forma a melhorar o desempenho dos cimentos asfálticos às ações térmicas e de tráfego. De acordo com IBP (1996), baseado no tipo de técnica a ser empregada, é possível selecionar os modificadores para melhorar algumas propriedades fundamentais dos cimentos asfálticos, como: susceptibilidade térmica, resistência coesiva, comportamento reológico e adesão.

A adição de polímeros aumenta a coesão, resistência ao envelhecimento e acrescenta propriedades elásticas aos cimentos asfálticos, buscando-se, com isso, um ligante que apresente as mesmas características de fluidez nas temperaturas de mistura, aplicação e compactação, e apresente também uma faixa de trabalho plástico superior ao cimento asfáltico convencional, ou seja, que não se torne rígido nas temperaturas baixas e que mantenha suas características plásticas até acima dos limites superiores de temperatura que o pavimento venha atingir (RAMOS et al., 1996).

O cimento asfáltico modificado com polímero sofre alteração em uma ou mais das seguintes propriedades (FREITAS, 1996):

susceptibilidade térmica – caracteriza a variação da consistência em função da temperatura. A grande finalidade da incorporação de polímero ao asfalto está na redução da susceptibilidade, ampliando a faixa que separa a fragilidade a frio do amolecimento a quente;

coesão – definida como a energia necessária para romper a película do cimento asfáltico. A incorporação do polímero no cimento asfáltico tem como finalidade, aumentar a coesão, conseguindo assim, uma consistência satisfatória em toda faixa de temperatura de serviço;

elasticidade – é a deformação causada sob efeito do tráfego e das variações de temperatura suportando esta deformação de modo reversível sem rompimento. A incorporação de polímero ao cimento asfáltico acentua a elasticidade, mantendo-a na faixa mais ampla das temperaturas de utilização;

resistência à fadiga – sob efeito do tráfego, os pavimentos são solicitados de maneira repetida e consomem progressivamente sua capacidade de resistência. A incorporação de polímero ao cimento asfáltico aumenta essa capacidade, sobretudo às baixas temperaturas.

2.2.2. Cimentos asfálticos modificados com polímero

O polímero é um composto químico de alto peso molecular formado pela união seqüenciada de várias moléculas pequenas iguais ou de vários tipos diferentes, denominadas monômeros. O termo polímero refere-se a uma macromolécula sintética constituída por meio de reação química de muitas unidades repetidas, os monômeros, unidas umas as outras por longas cadeias.

Os polímeros não são produtos homogêneos; contêm misturas de moléculas de variados pesos moleculares. Em razão da grande massa, não ocorrem, em geral, modificações fundamentais pela entrada ou retirada de alguns átomos ou grupos de átomos, ao contrário do que se observa nos compostos químicos usuais. Os polímeros são formados pela reação dos compostos químicos denominados

“monômeros”. Os polímeros podem ser homopolímeros apresentando o mesmo tipo de monômeros, ou copolímeros se apresentarem mais de um tipo de monômetro.

2.2.2.1. Classificação dos polímeros

Os polímeros industriais usados para modificação de ligantes asfálticos são essencialmente de dois tipos: plastômeros e elastômeros. Os plastômeros resultam em misturas asfálticas com maior estabilidade e módulo de rigidez, enquanto, os elastômeros resultam em misturas asfálticas com maior elasticidade, dando um pavimento mais flexível.

Os copolímeros de etileno acetato de vinila (EVA) são os representantes típicos dos plastômeros, que são resinas termoplásticas obtidas por copolimerização do etileno com o acetato de vinila em elevadas pressões de reação. Sua composição pode variar de uns poucos por cento de acetato até cerca de 50%. Nestes copolímeros a redução do teor de acetato de vinila acarreta aumento do módulo de rigidez, da temperatura do ponto de amolecimento e a diminuição da temperatura de fragilidade. Suas maiores vantagens são a resistência à flexão e estabilidade térmica, aliadas a um custo razoável (LEITE, 1999).

Os elastômeros termoplásticos são os polímeros que apresentam simultaneamente propriedades elastoméricas e termoplásticas, em caráter reversível. Em uma ampla faixa de temperaturas, cujos limites dependem dos seus monômeros constituintes e da proporção entre eles, possuem propriedades elásticas com comportamento semelhante ao das borrachas vulcanizadas. A altas temperaturas, superiores ao seu ponto de fusão, se comportam como plásticos, podendo ser moldados. Após sua fusão, o seu posterior resfriamento lhe devolve as propriedades elásticas (MARTINHO et al., 1994).

A modificação do cimento asfáltico com elastômero, em geral, consiste de uma mistura física, podendo também ocorrer ligações cruzadas. Vários tipos de homopolímeros e copolímeros podem ser usados, sendo que os mais comuns são os copolímeros SBR, copolímeros em diblocos SB ou triblocos SBS. Os triblocos podem ser lineares ou estrelados ou ainda parcialmente hidrogenados (*WORLD*

*ROAD ASSOCIATION – TECHNICAL COMMITTEE FLEXIBLE ROADS*¹ (1998) apud LEITE, 1999).

Os elastômeros apresentam um comportamento típico de borracha vulcanizada à temperatura ambiente, quando misturados com o cimento asfáltico propiciam uma estrutura macromolecular em forma de rede capaz de dar estabilidade dimensional ao conjunto (LEITE et al., 1995).

2.2.2.2. Polímero SBS

São copolímeros em bloco de estireno e butadieno ou estireno e isopreno, escoam livremente quando aquecidos, apresentando boas propriedades de resistência mecânica e de resiliência quando à temperatura ambiente. Isto se deve à morfologia desses polímeros que decorre da incompatibilidade entre os blocos de estireno e dieno, resultando em uma matriz de dieno dispersos em domínios de poliestirenos, que atuam como centros de ancoragem de força, do mesmo modo que as ligações cruzadas na borracha vulcanizada. Os copolímeros de SBS apresentam propriedades de escoamento superiores, sendo, desta forma, altamente favorável à mistura com o cimento asfáltico, não havendo um aumento muito significativo da viscosidade (*WORLD ROAD ASSOCIATION – TECHNICAL COMMITTEE FLEXIBLE ROADS*¹, apud LEITE, 1999).

Os domínios de blocos de poliestirenos atuam como uma ligação transversal física formando uma rede elastomérica. A eficácia dessas ligações diminui rapidamente com a temperatura do poliestireno acima de sua temperatura de transição vítrea (aproximadamente 100 °C). Com o resfriamento, os domínios de poliestireno melhoram e a resistência e elasticidade são restauradas. Conseqüentemente, a introdução do polímero SBS pode mudar drasticamente as propriedades reológicas do ligante (LU & ISACSSON, 1999).

WORLD ROAD ASSOCIATION – TECHNICAL COMMITTEE FLEXIBLE ROADS (1998). Use of modified bituminous binders, special bituminous with additives in pavements applications international workshop modified bitumens. Roma, p 17 – 19.international workshop modified bitumens. Roma, p 17 – 19.

O caráter termoplástico dos copolímeros SBS a elevadas temperaturas e sua capacidade de formar uma rede contínua quando resfriados são as principais razões que levam a sua grande utilização como modificador de cimento asfáltico (ISACSSON & LU, 1995). De acordo com RAMOS et al. (1996), o polímero SBS, por ser termoplástico, permite que o cimento asfáltico a altas temperaturas possa fluir devido à fusão dos domínios de estireno, e a baixas temperaturas impede que o cimento asfáltico se torne quebradiço devido à presença dos domínios de butadienos. Nas temperaturas mais altas de trabalho do pavimento, o cimento asfáltico se torna excessivamente fluido, sendo que, os domínios de estireno permanecem, ainda, sólidos, como o cimento asfáltico fica envolvido pela malha de SBS o novo ligante trabalha, nessas condições, como borracha vulcanizada, tornando-se fluido em temperaturas mais elevadas do que as atingidas pelo pavimento.

O uso de modificadores está condicionado a sua compatibilidade com a base betuminosa, fato que restringe o tipo a ser usado. O copolímero SBS apresenta um grande interesse devido ao balanço entre a compatibilidade com o cimento asfáltico, velocidade de dissolução e propriedades obtidas CERATTI et al. (1996). O SBS, pelas suas características, quando adicionado ao cimento asfáltico em proporções adequadas, confere excelentes propriedades mecânicas e reológicas às misturas obtidas (MARTINHO et al., 1994).

2.2.3. Cimentos asfálticos modificado com borracha

Segundo HEITZMAN (1992), a cada ano nos Estados Unidos, cerca de 285 milhões de pneus são descartados. Destes, 33 milhões são recauchutados, 22 milhões são reutilizados e 42 milhões são destinados a outras alternativas. Os 188 milhões de pneus, restantes, são estocados, levados a aterros sanitários ou despejados de maneira ilegal por todo o país. Segundo a estimativa da Agência de Proteção Ambiental Americana, a dimensão do problema de restos de pneus está por volta de 2 a 3 bilhões de pneus descartados. A combustão destes para combustíveis e a produção de asfalto modificado com borracha para o uso em pavimentação asfáltica têm mostrado um número significativo para o uso comercial.

A adição de borracha de pneus descartados aos materiais de pavimentação asfáltica pode ser feita de duas formas distintas: processo úmido e processo seco. O processo úmido é definido como um método que adiciona a borracha de pneu moída ao cimento asfáltico antes de preparar a massa asfáltica e o processo seco é definido como um método de adição de partículas de borracha de pneu diretamente na massa asfáltica durante o processo de mistura, onde estas partículas atuam como parte do agregado mineral.

O processo seco é limitado a aplicação em concreto asfáltico, enquanto, o processo úmido tem sido aplicado como selante de trincas, tratamentos superficiais, camada de ligação e concreto asfáltico. Segundo ZANZOTTO & KENNEPOHL (1996), durante o processo úmido, ocorre uma dissolução parcial da borracha, mas, principalmente, a absorção dos óleos do cimento asfáltico pela borracha, portanto, esta reação não pode ser considerada uma reação química real. Conforme HEITZMAN (1992) e CHOUBANE et al. (1999), dependendo da temperatura e tempo de mistura, o processo úmido poderá permitir uma reação completa entre o cimento asfáltico e a borracha.

2.2.4. O ligante asfalto-borracha

Quando a borracha moída reage com asfalto, forma um material denominado ligante asfalto-borracha, viscoso, elástico e adesivo. A qualidade elástica é causada pela ação mecânica das partículas de borracha não reagidas, desenvolvendo um agregado elástico. A absorção de óleos aromáticos do cimento asfáltico, pela cadeia de polímero da borracha moída, aumenta a viscosidade do cimento asfáltico modificado com borracha (HANSON et al., 1994).

Segundo o mesmo autor, o teor ótimo de cimento asfáltico para um concreto asfáltico modificado com borracha, geralmente será maior que o concreto asfáltico convencional, isso acontece, porque o cimento asfáltico modificado com borracha é mais viscoso, a película de revestimento do agregado é mais grossa e o cimento asfáltico modificado com borracha contém algumas partículas sólidas de borracha não reagidas, que aumentam o volume do mesmo. O teor ótimo de uma massa

asfáltica, modificada com borracha, aumenta com a relação borracha moída/asfalto no ligante.

Quando o cimento asfáltico e a borracha de pneu são misturados, existe uma interação entre os materiais, esta interação é classificada como uma reação que forma um composto denominado asfalto-borracha. O resultado é um cimento asfáltico modificado que apresenta propriedades reológicas diferentes do cimento asfáltico original. Segundo HEITZMAN (1992), o grau de modificação é afetado por um número de variáveis, tais como:

- tempo e temperatura de reação;
- energia mecânica durante a mistura;
- tamanho e textura da borracha;
- componente aromático do cimento asfáltico original;
- proporção de cimento asfáltico e borracha;
- compatibilidade com a borracha.

O ligante asfalto-borracha exibe um aumento nas suas propriedades quando comparadas com cimento asfáltico convencional em laboratório, esse aumento das propriedades do ligante asfalto-borracha pode ser uma indicação de melhor desempenho do material de pavimentação no campo, porém, existem inúmeras variáveis, além das propriedades do ligante, que também afetam no desempenho do pavimento. A capacidade da borracha moída aumentar as propriedades do cimento asfáltico, depende da compatibilidade entre o cimento asfáltico e a borracha, o tipo e a quantidade de óleos aromáticos no cimento asfáltico representa uma maior função na determinação da compatibilidade (HEITZMAN, 1992).

Existem especificações técnicas para o ligante asfalto-borracha, com exigências de propriedades que devem ser atendidas visando sua utilização sob diferentes condições climáticas. ODA (2000) citou as especificações BAKER RUBBER Inc. e ASTM-D6114, transcritas nas Tabelas 2.1 e 2.2.

Tabela 2.1. Especificações para diferentes tipos de ligante asfalto-borracha (*BAKER RUBBER Inc.*, 1998).

Tipo de Ligante	ARB-1	ARB-2	ARB-3
Método de ensaio	Zona Climática		
Média das temperaturas máximas semanais (°C)	>38	26 a 38	<26
Média das temperaturas mínimas semanais (°C)	>0	-12 a 0	<-12
Viscosidade aparente (cP) 175 °C	1000 mín	1000 mín	1000 mín
ASTM D2994 haste 3, 12 rpm	4000 máx	4000 máx	4000 máx
Penetração (1/10 mm), 25 °C	25 mín	50 mín	75 mín
AASHTO T49 100 g, 5 s	75 máx	100 máx	150 máx
Penetração (1/10 mm), 4 °C - AASHTO T49, 200 g, 60 s	15 mín	25 mín	40 mín
Ponto de amolecimento (°C) - ASTM D36	54 mín	49 mín	43 mín
Resiliência (%) 25 °C - ASTM D3407	20 mín	10 mín	0 mín
Ductilidade (cm) 4 °C - AASHTO T51 1 cm/min	5 mín	10 mín	20 mín
Ensaio com resíduo envelhecido em estufa de filme fino (AASHTO T179)			
Penetração 4 °C (%original) - AASHTO T49 200 g, 60 s	75 mín	75 mín	75 mín
Ductilidade 4 °C (%original) - AASHTO T51 1 cm/min	50 mín	50 mín	50 mín

Tabela 2.2. Propriedades físicas de ligantes asfalto-borracha (ASTM, 1997).

Tipo de Ligante	TIPO I	TIPO II	TIPO III
Método de ensaio			
Viscosidade aparente, 175 °C: cP	1500 mín	1500 mín	1500 mín
Método modificado ASTM D2196, Método A ^{A,B}	5000 máx	5000 máx	5000 máx
Penetração, 25 °C, 100 g, 5 s: 1/10 mm (ASTM D5)	25 mín 75 máx	25 mín 75 máx	50 mín 100 máx
Penetração, 4 °C, 200 g, 60 s: 1/10 mm (ASTM D5)	10 mín	15 mín	25 mín
Ponto de amolecimento: °C (ASTM D36)	57,2 mín	54,4 mín	51,7 mín
Resiliência, 25°C: % (ASTM D5329)	25 mín	20 mín	10 mín
Ponto de fulgor: °C (ASTM D93)	232,2 mín	232,2 mín	232,2 mín
Ensaio com resíduo em estufa de filme fino (ASTMA D1754) ^C			
Penetração, 4 °C: % original (ASTM D5)	75 mín	75 mín	75 mín

^APode ser utilizado um Viscosímetro *Brookfield* com leitura digital.

Para modelos da série LV, usar *spindle* 3 a 12 rpm.

Para modelos das séries RV e HÁ, usar *spindle* 3 a 20 rpm.

^BPodem ser utilizados viscosímetros tipo *Rion* ou *Haake* (com Rotor N° 1) quando correlacionado com as medidas do *Brookfield*. De qualquer forma, o *Brookfield* será o “método” de referência.

^CO ensaio de resíduo *RTFOT* (Ver método de ensaio D 2872) pode ser substituído pelo o ensaio de resíduo *TFOT*.

As duas especificações propostas baseiam-se em características climáticas. A *ASTM* (1997) apresenta uma especificação para três tipos de ligantes, divididos de acordo com a média das temperaturas máximas e mínimas semanais. Os limites estabelecidos para a média das temperaturas máximas foram: 43 °C, de 27 °C a 43 °C e menor que 27 °C. Contudo, os limites estabelecidos para a média das temperaturas mínimas foram: maior que -1 °C, de -9 °C a -1 °C e menor que -9 °C.

2.2.5. Aplicações do ligante asfalto-borracha

As aplicações do ligante asfalto-borracha em pavimentação podem ser:

- selante de trincas e juntas;
- tratamentos superficiais;
- membrana de absorção de tensões (*SAM*);
- membranas intercamadas de absorção de tensões (*SAMI*);
- concreto asfáltico usinado a quente.

2.2.5.1. Selantes de trincas e juntas

As trincas são uns dos problemas mais desagradáveis, que os departamentos rodoviários encaram em seus esforços para fornecer qualidade à vida útil do pavimento. Muitos materiais, como cimento asfáltico e emulsões têm sido usados como selantes de trincas, na tentativa de encontrar uma forma de selar efetivamente as trincas e estender a vida útil do pavimento. Porém, durante a década de 70 e início da década de 80, um composto de vedação de trincas, contendo borracha moída de pneu adicionada ao cimento asfáltico, surgiu como um novo e efetivo meio de reparo de trincas. O autor comparou a vida útil desse selante com outro de asfalto convencional, verificando que o selante asfalto-borracha dura cerca de três vezes mais que o convencional (ESTAKHRI et al., 1992).

2.2.5.2. SAM (*Stress Absorbing Membrane*)

A SAM é uma espécie de tratamento superficial usando ligante asfalto-borracha, normalmente empregado para prevenir e/ou retardar a formação de trincas por reflexão em pavimentos asfálticos. A técnica executiva consiste em espalhar o ligante asfalto-borracha, com cerca de 20 a 30% de borracha por peso do ligante, a uma taxa de aproximadamente $2,7 \text{ l/m}^2$, que será coberta logo em seguida pela sobreposição de agregados pré-aquecidos. A menor susceptibilidade térmica e maior elasticidade do ligante asfalto-borracha conduz a uma maior resistência às tensões provocadas pelo tráfego e pelas variações climáticas (HEITZMAN, 1992).

As SAM proporcionam uma membrana à prova d'água, bastante durável, apresentando uma capacidade excepcional de flexionar conjuntamente com o pavimento quando acionados pelas cargas do tráfego, esta membrana apresenta, ainda, a propriedade de expandir e de retrair com as variações climáticas verificadas em casos extremos (CAMPOS et al., 2000).

2.2.5.3. SAMI (*Stress Absorbing Membrane Interlayer*)

As SAMI produzidas por meio de processos executivos idênticos aos da SAM, se diferem unicamente e exclusivamente pelo fato de serem recomendadas apenas para construção de camadas intermediárias que precedem a execução de reforços estruturais a serem compostos, respectivamente, por concretos asfálticos, lamas asfálticas, micro-revestimentos asfálticos ou camadas porosas de atrito. A SAMI é recomendada, fundamentalmente, pela sua excepcional capacidade de absorver as tensões horizontais de tração, condição esta que se apresenta como um procedimento efetivo para reduzir a probabilidade de ocorrência de trincas por reflexão nas camadas superiores do reforço estrutural (CAMPOS et al., 2000).

Existem dois tipos de SAMI, um composto de duas camadas e outro composto de três camadas. A SAMI composta de duas camadas é colocada sobre o pavimento existente e reforçada com uma camada de 25 a 75 mm de concreto asfáltico. A SAMI composta por três camadas, consiste primeiramente, no lançamento de uma camada

de nivelamento de concreto asfáltico, seguida pela *SAMI*, sobre a qual é colocada uma camada de reforço de 25 a 75 mm de concreto asfáltico. Este tipo de tratamento com três camadas é executado quando o pavimento apresenta deterioração provocada por trincas. Durante a construção da *SAMI*, deve-se assegurar que o diluente adicionado ao ligante asfalto-borracha evapore antes do lançamento da camada de reforço.

2.2.5.4. Concreto asfáltico usinado a quente

O emprego do ligante asfalto-borracha em concreto asfáltico usinado a quente, também pode proporcionar melhores comportamentos, podendo ser empregados, tanto em misturas contínuas, como em misturas descontínuas. Previsões de comportamentos em campo, baseados em ensaios laboratoriais, indicam que as misturas asfalto-borracha externam vidas de fadiga substancialmente maiores que aquelas correspondentes às misturas convencionais, sendo menos sensíveis as variações de temperaturas, em termos de resistência ao acúmulo de deformação permanente (CAMPOS et al, 2000).

2.4. Ensaios para Determinação de Propriedades Mecânicas das Misturas Asfálticas

2.4.1. Ensaio de fluência por compressão uniaxial dinâmica

O ensaio de fluência por compressão uniaxial dinâmica é semelhante ao estático, diferindo no sistema de aplicação da carga, segundo MOTTA et al. (1996), o ensaio de fluência uniaxial dinâmica consiste na aplicação de pulsos de carga ao corpo-de-prova, a uma determinada frequência com um período de aplicação de carga definido. Ainda, segundo os autores, há uma tendência mundial quanto à adoção de ensaios dinâmicos em vez dos estáticos.

Segundo VALKERING et al. (1990), o aumento na estabilidade da mistura asfáltica causada pela modificação do cimento asfáltico não é refletido pelo ensaio de fluência uniaxial estática, isso acontece, porque os cimentos asfálticos modificados e não modificados são diferentes reologicamente. As falhas do ensaio de fluência uniaxial estática para os cimentos asfálticos modificados estão relacionadas à recuperação da deformação, após a remoção da carga, ao contrario do ensaio dinâmico, que consegue diferenciar tais comportamentos. Porém, ainda segundo os autores, o ensaio de fluência uniaxial estática continua sendo válido para cimentos asfálticos convencionais para a previsão da resistência à deformação permanente.

Ensaio de fluência por compressão uniaxial dinâmica realizados por CERATTI et al. (1996) demonstraram a superioridade das misturas asfálticas modificadas com polímero em relação às misturas convencionais, sugerindo que as propriedades mecânicas dos cimentos asfálticos modificados têm mostrado um grande potencial para evitar deformações permanentes das misturas. Os autores também observaram, nesse estudo, uma grande influência do teor do cimento asfáltico nas misturas convencionais, tendência praticamente inexistente nas misturas asfálticas modificadas.

Segundo TAYEBALI et al. (1992), as deformações plásticas acumuladas obtidas sob carregamento dinâmico parecem representar melhor a previsão do potencial de formação de trilhas de roda. O acúmulo de deformação plástica sob a ação do carregamento repetitivo fornece uma boa medida para avaliar a tendência de formação de trilha de roda em misturas asfálticas contendo cimentos asfálticos modificados. Para CORTÉ et al. (1994), o ensaio de fluência uniaxial dinâmica parece ser mais representativo com o que acontece no campo, desta forma, podemos considerar que este ensaio possa prever a formação de trilha de roda para os vários tipos de misturas.

Assim como o ensaio de fluência por compressão uniaxial estática, o ensaio de fluência por compressão uniaxial dinâmica não apresenta um consenso em relação às especificações de ensaio. Existe uma variação dos tempos de carregamento e repouso no referido ensaio. Alguns autores, como VALKERING et al. (1990), CORTÉ et al. (1994) e EL HUSSEIN & YUE (1994), adotaram tempo de carregamento de 0,2 segundos e período de repouso de 1,8 segundos, resultando em um tempo total de

ciclo de 2,0 segundos, enquanto outros autores, como MOTTA et al. (1996) e CERATTI et al. (1996), adotaram tempo de carregamento de 0,1 segundo e período de repouso de 0,9 segundo, resultando em um tempo de total de ciclo de 1 segundo. ULMGREN (1996) propôs a modificação do ensaio de fluência por compressão uniaxial dinâmica, aumentando o diâmetro do corpo-de-prova de 100 mm para 150 mm e mantendo a dimensão do prato de aplicação de carga em 100 mm. Segundo ULMGREN (1996), o fato do método tradicional apresentar o diâmetro do prato de aplicação de carga semelhante ao diâmetro do corpo-de-prova significa que na prática esse método não faz jus a algumas características das misturas asfálticas, que obtêm sua estabilidade não só pelas forças de coesão, mas principalmente pelo atrito interno dos agregados. Mediante o aumento do diâmetro do corpo-de-prova e da manutenção da dimensão do prato, pretende-se obter algum tipo de pressão lateral, o que não acontece no ensaio tradicional. As deformações permanentes obtidas por meio do ensaio modificado, mostram uma boa correlação com as deformações obtidas por intermédio do ensaio de trilha de roda (“wheel tracking test”) ($R=0,91$), ao contrário da correlação observada no ensaio tradicional ($R=0,36$).

2.4.2. Ensaio de resistência à tração por compressão diametral

O ensaio de tração indireta consiste em carregar uma amostra cilíndrica com cargas de compressão estática distribuída ao longo de duas geratrizes opostas. Essa configuração de carregamento desenvolve uma tensão de tração relativamente uniforme, normal à direção da carga aplicada e ao longo do plano vertical, levando a amostra à ruptura.

Por meio de um ensaio de tração indireta por compressão diametral FROCHT² (1948) e TIMOSHENKO & GOODIER³ (1951) apud SCHMIDT (1972) mostraram matematicamente que uma carga de compressão uniforme aplicada perpendicularmente ao plano diametral horizontal de um disco delgado gera uma

² FROCHT, M. M. (1948). Photoelasticity, v.2, John Willey and Sons, New York.

tensão de tração uniforme sobre o plano diametral vertical contendo a carga aplicada. FROCHT² (1948) apud SCHMIDT (1972) desenvolveu um tratamento matemático para estes, por meio de análises fotoelásticas de discos plásticos.

Segundo SCHMIDT (1972), quando as considerações feitas por estes autores são aplicadas a discos carregados dinamicamente ao longo de seu diâmetro, é possível determinar o módulo elástico do material. Segundo FROCHT² (1948) apud SCHMIDT (1972), as tensões de tração (σ_x) e de compressão (σ_y), ao longo de seu diâmetro (D) e perpendicularmente à carga aplicada (F) são dadas pelas expressões 2.1 e 2.2:

$$\sigma_x = \left[\frac{2F}{\pi t d} \left(\frac{D^2 - 4x^2}{D^2 + 4x^2} \right) \right]^2 \quad (2.1)$$

$$\sigma_y = \frac{-2F}{\pi t d} \left[\frac{4D^2}{(D^2 + 4x^2)^2} - 1 \right] \quad (2.2.)$$

Onde:

t = espessura do disco;

x = distancia medida a partir da origem ao longo da abscissa.

Considerando o estado plano de tensões e comportamento elástico, a expressão (2.3) para deformação (ε_x), ao longo do diâmetro, é dada por:

$$\varepsilon_x = \frac{1}{E} [\sigma_x - \nu(\nu_y + \nu_z^0)] \quad (2.3)$$

Onde:

³ TIMOSHENKO, S. & GOODIER, J. N. (1951). Theory of elasticity, 2ª ed., McGraw-Hill, New York.

ν = coeficiente de Poisson.

A deformação total (Δ) é dada integrando a deformação entre $-d/2$ e $+d/2$, conforme expressão 2.4:

$$\Delta = \int_{-\frac{d}{2}}^{+\frac{d}{2}} \varepsilon_x dx \quad (2.4)$$

Integrando, obtém-se a expressão 2.5:

$$E = F \left(\frac{\nu + 0,2732}{t\Delta} \right) \quad (2.5)$$

Para materiais puramente elásticos, a expressão (2.5) poderá ser aplicada para carregamentos, tanto estáticos, quanto dinâmicos. Para materiais visco-elásticos, como concreto asfáltico, a expressão (2.5) permite calcular o módulo de resiliência (MR) desde que o carregamento seja de curta duração, a fim de minimizar o efeito viscoso da massa asfáltica.

Segundo MAUPIN (1972) o ensaio de tração indireta apresenta algumas vantagens e desvantagens quando utilizados em concreto asfáltico: a sua simplicidade, o uso de corpos-de-prova Marshall, o fato das irregularidades não afetarem seriamente os resultados e o baixo coeficiente de variação dos resultados do ensaio, são algumas das vantagens do ensaio de tração indireta. Todavia, as maiores desvantagens do ensaio são a respeito da teoria envolvida, que assume que o material do corpo-de-prova é elástico, sendo o concreto asfáltico visco-elástico em quase todas as faixas de temperatura; a teoria também assume um carregamento em linha, enquanto, na prática, a carga é distribuída em uma faixa de carregamento. Segundo o autor, essas desvantagens não são consideradas sérias, e que, as vantagens compensam as desvantagens.

2.4.3. Ensaio de módulo de resiliência por compressão diametral dinâmica

Os procedimentos correntemente utilizados para a determinação dos módulos de resiliência de misturas asfálticas incluem ensaios estáticos e dinâmicos. Segundo QUEIROZ & VISSER, (1978), ensaios estáticos podem ser adequados, por exemplo, para o dimensionamento de pavimentos de um pátio de estacionamento industrial, enquanto os ensaios dinâmicos são mais convenientes para os pavimentos rodoviários e pistas de pouso e decolagem, que são submetidos a cargas dinâmicas.

O ensaio de tração indireta por compressão diametral dinâmica é empregado na determinação do módulo de resiliência de misturas asfálticas, uma vez que simula o comportamento mecânico do revestimento asfáltico do pavimento, na zona onde ocorrem as deformações específicas de tração, responsáveis pela fadiga da camada e conseqüentemente a vida em serviço da estrutura (PINTO & PREUSSLER, 1980). Segundo SCHMIDT (1972) e MAUPIN (1972), o ensaio de tração indireta por compressão diametral é indicado para a avaliação de características resilientes de misturas asfálticas.

GONZALEZ⁴ et al. (1975) apud QUEIROZ E VISSER (1978) realizaram estudos na Universidade do Texas para avaliar os métodos mais utilizados em laboratório para a determinação de propriedades fundamentais dos materiais. Os autores concluíram que o ensaio de tração indireta é o mais conveniente para a determinação das características resilientes das misturas asfálticas devido os seguintes fatores:

- simplicidade de execução do ensaio;
- tipo de amostras e aquecimento idênticos aos usados nos ensaios de compressão;
- as condições superficiais não afetam seriamente a ruptura;
- a ruptura inicia-se em uma região de tensão de tração relativamente uniforme;
- o coeficiente de variação dos resultados dos ensaios compara do com outros métodos de ensaio é baixo;

⁴ GONZALEZ, G.; KENNEDY, T. W.; ANAGNOS, J. N. (1975). Evaluation of the resilient elastic characteristics of asphalt mixtures using the indirect tensile test. Research Report 183-6, Center of Highway Research, University of Texas, Austin.

ensaio pode fornecer informações sobre o módulo de resiliência, coeficiente de Poisson, características de fadiga e de deformações permanentes.

CAPÍTULO 3: MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. Introdução

Neste capítulo serão apresentados a descrição e a caracterização dos materiais empregados na execução das misturas asfálticas, bem como os métodos utilizados para sua avaliação, os procedimentos de dosagem das misturas e dos ensaios de fluência por compressão uniaxial dinâmica, resistência à tração por compressão diametral e módulo de resiliência por compressão diametral dinâmica.

3.2. Materiais

3.2.1. Agregados minerais

Os agregados minerais utilizados no preparo das misturas são obtidos pelo processo de britagem de rocha basáltica, provenientes da pedreira Bandeirantes, localizada no município de São Carlos, Estado de São Paulo.

Esses agregados foram selecionados para obtenção de uma mistura correspondente ao centro da faixa "C" do DNER (DNER-ES 313/97), conforme figura 3.1. A composição granulométrica da mistura foi obtida a partir da separação dos agregados nas frações correspondentes às peneiras especificadas por esta norma e posteriormente misturadas nas proporções adequadas para a obtenção da distribuição granulométrica adotada (tabela 3.1). Esse procedimento teve por objetivo proporcionar misturas homogêneas de agregados para todos os corpos de provas.

Figura 3.1. Faixa "C" DNER (1997) e distribuição granulométrica adotada.

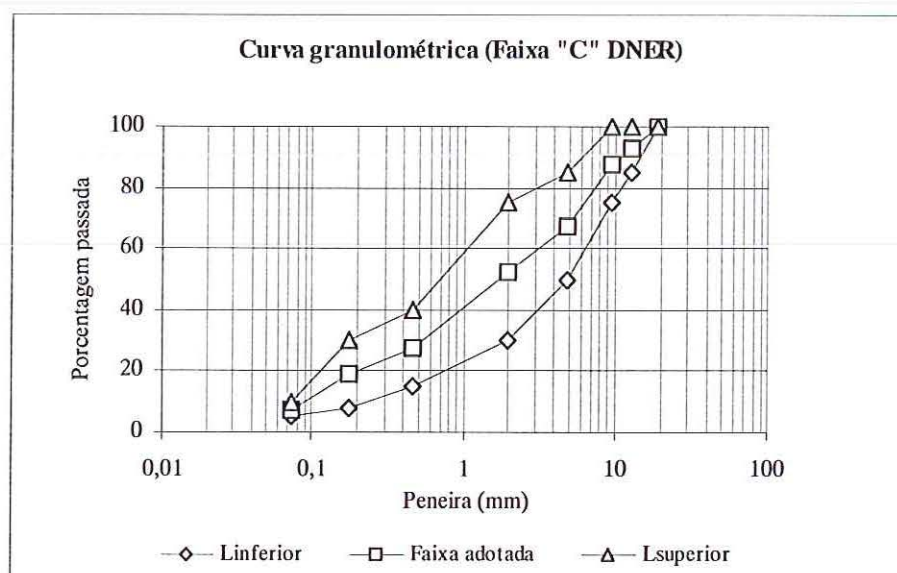


Tabela 3.1. Composição granulométrica faixa "C" DNER (1997).

Peneira (mm)	ASTM	Faixa "C" DNER		
		Linferior	Média	Lsuperior
19,1	3/4"	100	100	100
12,7	1/2"	85	92,5	100
9,52	3/8"	75	87,5	100
4,86	Nº4	50	67,5	85
2,00	Nº10	30	52,5	75
0,46	Nº40	15	27,5	40
0,177	Nº100	8	19,0	30
0,074	Nº200	5	7,5	10

Para a determinação de algumas propriedades físicas dos agregados minerais foram realizados os ensaios de abrasão Los Angeles, densidade real dos agregados graúdos e miúdos e de adesividade dos agregados graúdos e miúdos ao cimento asfáltico. Os resultados desses ensaios estão apresentados na tabela 3.2.

Tabela 3.2. Ensaio de caracterização física dos agregados minerais.

Ensaio	Resultado	Método	
Densidade real das partículas (g/cm ³)	2.872	DER/SP M3-61	
Abrasão	Graduação B	21.32	
Los Angeles	Graduação C	24.24	ME 035/98
(%)	Graduação D	28.53	
Adesividade	Agregado graúdo	Não Satisfatória	ME 078/94
(CAP 20)	agregado miúdo	Não Satisfatória	ME 079/94

3.2.2. Cimentos asfálticos

Para a moldagem dos corpos-de-prova foram utilizados três tipos diferentes de cimentos asfálticos:

Cimento asfáltico de referência CAP 20 puro;

CAP 20 modificado com 4,5% de polímero SBS;

CAP 20 modificado com 20% de borracha reciclada de pneu.

Estes cimentos asfálticos foram fornecidos pela empresa Asfaltos Continental, localizada no município de Ribeirão Preto, Estado de São Paulo. O CAP 20 foi escolhido por ser um dos cimentos asfálticos mais utilizado nos serviços de pavimentação no Brasil. O teor de polímero SBS (4,5%) e borracha (20%) adicionados ao cimento asfáltico foram determinados pela própria empresa que forneceu o material.

Mediante ensaios de viscosidade Saybolt-Furol, penetração, ponto de amolecimento e ponto de fulgor foram determinadas algumas características físico-químicas dos cimentos asfálticos. Os resultados são apresentados na tabela 3.3. A tabela 3.4 apresenta as especificações, tanto para o cimento asfáltico convencional, quanto para o cimento asfáltico modificado com polímero. As especificações para o cimento asfáltico modificado com borracha são apresentadas nas tabelas 2.1 e 2.2, capítulo 2.

Tabela 3.3. Resultados dos ensaios de caracterização física dos cimentos asfálticos.

[Fonte: Asfaltos Continental].

Ensaio	CAP 20 puro	CAP 20 + 4,5% polímero	CAP 20 + 20% borracha	Método
Viscosidade	135 °C	189,2	402,0	-
Saybolt-furol (s)	177 °C	30,1	68,0	840
	185 °C	-	-	98,0
Viscosidade absoluta a 60 °C, p	2102,0	não realizado	não realizado	MB 827
Penetração 100g, 5s, 25°C (0,1mm)	54,0	46,7	0,7	ME 003/99
Ponto de amolecimento, °C	48,0	67,5	97,5	ASTM D36
Ponto de fulgor, °C	256,5	278,0	241,0	ME 148/94
Índice de susceptibilidade térmica ^a	-1,5	2,25	-0,35	-

$$^a IST = \frac{500 \cdot \log(PEN) + 20 \cdot PA - 1951}{120 - 20 \cdot \log(PEN) + PA}, \text{ onde PEN é a penetração em 0,1 mm e PA é}$$

o ponto de amolecimento em °C.

Tabela 3.4. Especificações dos cimentos asfálticos para os ensaios realizados.

Ensaio		CAP 20 ^b	CAP 20 + 4,5% Polímero SBS ^c
Viscosidade	135 °C	120 mín	120 mín
Saybolt-Furol (s)	177 °C	30 a 150	-
Penetração 100g, 5s, 25 °C (0,1 mm)		50 mín	45 mín
Ponto de amolecimento (°C)		-	60 a 85
Ponto de fulgor (°C)		235 mín	235 mín
Índice de susceptibilidade térmica		(-1,5) a (+1,0) ^a	2,0 a 5,0 ^d

^bReg. Técnico 01/92 – Portaria DNC Nº 5/18.02.93 – Rev.02 – FNC

^cDNER (1999) – EM 396/99

^dIST ($\times 10^2$) determinado a partir da inclinação da reta penetração x temperatura, para temperaturas de 15 °C, 20 °C, 25 °C, 30 °C e 35 °C. A inclinação da reta é determinada pelo ajuste pelo ajuste da equação $\log(\text{PEN}) = C + AT$, aos pontos dos ensaios, onde:

$\log(\text{PEN})$ – logaritmo da penetração;

A – inclinação da reta;

C – Constante;

T – temperatura, °C.

3.2.3. Misturas asfálticas

3.2.3.1. Dosagem

A dosagem consiste na determinação das proporções adequadas dos componentes da mistura asfáltica, agregado mineral e cimento asfáltico. Uma dosagem adequada deve permitir à mistura resistir tanto aos esforços decorrentes da carga dos veículos, quanto à ação das intempéries, mediante a obtenção de algumas características, tais como, durabilidade, flexibilidade, resistência à deformação permanente e ao trincamento.

No Brasil os parâmetros limites usados no método de ensaio Marshall para concreto asfáltico usinado a quente são especificados pelo DNER-ES 313/97; esses limites são apresentados na tabela 3.5. Os parâmetros limites usados para concreto asfáltico com cimento asfáltico modificado com polímero são especificados pelo DNER-ES 385/99 apresentados na tabela 3.6.

As dosagens das misturas foram executadas conforme a norma NBR 12891/93 (ABNT, 1993), que emprega o método Marshall para a determinação do teor ótimo de cimento asfáltico.

Tabela 3.5. Limites usados no método de ensaio Marshall para concreto asfáltico convencional.

Discriminação	camada de rolamento
Porcentagem de vazios	3 a 5
Relação betume/vazios	75 a 82
Estabilidade, mínima	350 kgf (75 golpes) 250 kgf (50 golpes)
Fluência (mm)	2,0 a 4,5

Tabela 3.6. Limites usados no método de ensaio Marshall para concreto asfáltico modificado com polímero.

Discriminação	camada de rolamento
Porcentagem de vazios	3 a 5
Relação betume/vazios	75 a 82
Estabilidade, mínima	500 kgf (75 golpes)
Fluência (mm)	2,0 a 4,5
Resistência à tração por compressão diametral a 25 °C (Kgf/cm ²)	7,0 a 12,0

Para a escolha dos teores empregados neste trabalho foi realizada uma estimativa da quantidade ótima de material betuminoso por meio do método da superfície específica (M 148-60, DER-SP/1960).

A porcentagem de asfalto em relação à mistura em massa encontrada nesta pesquisa foi de 5,5%. Para as dosagens das misturas com cimento asfáltico convencional, cimento asfáltico modificado com polímero e cimento asfáltico modificado com borracha foram escolhidos os seguintes teores: 4,5%, 5,0%, 5,5%, 6,0%, 6,5%.

3.2.3.2. Temperatura de mistura e compactação

De acordo com a especificação de serviço ES 313/97 – DNER, a temperatura conveniente para a mistura do cimento asfáltico convencional deve estar situada entre 75 e 150 segundos Saybolt-Furol, indicando-se, preferencialmente, a viscosidade entre 85 e 95 segundos; entretanto, a temperatura do cimento asfáltico deve estar situada entre 107 e 177 °C. Esta especificação recomenda, para compactação da mistura, temperaturas em que o cimento asfáltico apresente viscosidade Saybolt-Furol entre 140 ± 15 segundos.

Com os resultados apresentados na tabela 3.3, obtém-se que, para o intervalo de viscosidade entre 75 e 150 segundos, a temperatura de mistura deve estar entre 160 e 165 °C e a temperatura de compactação deve estar entre 144 e 152 °C.

A especificação de serviço ES 385/99 – DNER recomenda que a temperatura de aquecimento do cimento asfáltico modificado com polímero deve ser de 150 °C acrescida de 3 °C para cada 1% de polímero, com um limite máximo de 180 °C e a temperatura de compactação deve ser 140 °C acrescida de 3 °C para cada 1% de polímero. Os agregados devem ser aquecidos de 10 a 15 °C acima da temperatura do asfalto-polímero com um limite máximo de 183 °C. Porém, essa especificação, ao contrário da especificação para cimento asfáltico convencional, ES 313/97 – DNER, não limita a temperatura em função de valores da viscosidade Saybolt-Furol.

Com os resultados apresentados na tabela 3.3, obtém-se a temperatura de mistura situada na faixa de 174 a 176 °C, e a de compactação situada entre 166 e 170 °C. Esses valores foram determinados trabalhando com as mesmas faixas de viscosidade do cimento asfalto convencional.

As temperaturas de mistura e compactação para o cimento asfáltico modificado com borracha, foram determinadas usando as mesmas faixas de viscosidade do cimento asfáltico convencional.

Com os resultados apresentados na tabela 3.3, obtém-se que a temperatura de mistura deve estar entre 186 °C e 194 °C e a temperatura de compactação entre 171 e 175 °C.

3.2.3.3. Moldagem dos corpos-de-prova

Os corpos-de-prova foram moldados com o compactador Marshall seguindo os padrões estabelecidos pela NBR 12891/93 (ABNT, 1993). A energia utilizada foi de 75 golpes em cada face.

A desmoldagem foi efetuada após resfriamento dos corpos-de-prova à temperatura ambiente, por um período de três horas.

Para cada dosagem foram confeccionados três corpos-de-prova para cada teor de cimento asfáltico, totalizando quinze corpos-de-prova para o cimento asfáltico convencional, quinze para o cimento asfáltico modificado com polímero e quinze para o cimento asfáltico modificado com borracha.

3.2.3.4. Ensaio Marshall

Confeccionados e desmoldados, os corpos-de-prova foram pesados ao ar e parafinados para determinar sua massa imersa. A figura 3.2 apresenta os corpos-de-prova desmoldados e parafinados. Após a determinação da massa imersa dos corpos-de-prova, a parafina foi retirada e os mesmos preparados para a realização dos ensaios de estabilidade e fluência Marshall, aquecidos, antecipadamente, durante vinte minutos, em banho-maria, a 60 °C. Para a realização dos ensaios Marshall foi empregada a prensa VERSATESTER 30M.

Os parâmetros determinados por meio do ensaio Marshall são: estabilidade (E), fluência (F), densidade aparente (D_a), densidade máxima teórica (D_t), volume de vazios (Vv), relação betume-vazios (RBV) e vazios do agregado mineral (VAM).

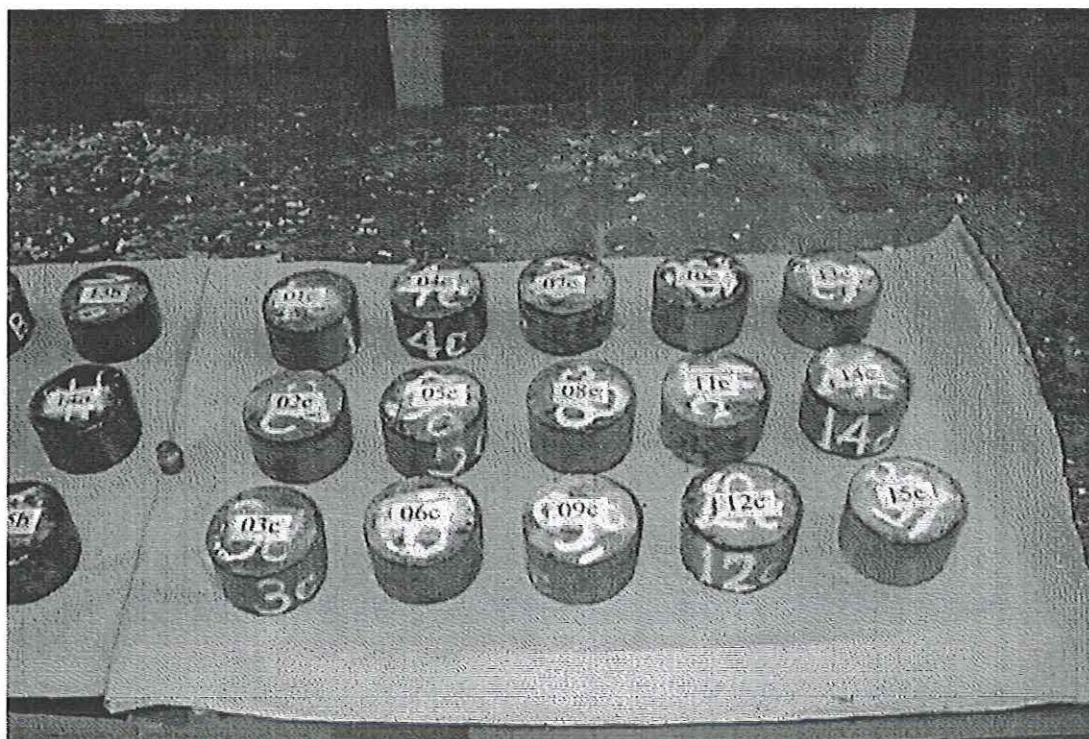


Figura 3.2. Corpos-de-prova após serem desmoldados e parafinados.

Os resultados do ensaio Marshall fornece curvas de massa específica, volume de vazios, relação betume-vazios, fluência e estabilidade em função dos teores de cimento asfáltico. O teor ótimo de trabalho de cada mistura foi escolhido com base em uma faixa de valores de teor de cimento asfáltico obtido a partir das especificações de serviço para projeto de misturas asfálticas, DNER-ES 313/97 (para misturas confeccionadas com cimento asfáltico convencional) e DNER-ES 385/99 (para misturas confeccionadas com cimento asfáltico modificado com polímero), apresentadas nas tabelas 3.5 e 3.6, respectivamente.

Uma das principais propriedades de uma mistura asfáltica é a sua estabilidade, ou seja, sua capacidade de resistir à deformação permanente quando submetida à passagem de veículos. Entretanto, ensaios laboratoriais como, por exemplo, o ensaio Marshall, idealizado para medir a estabilidade dessas misturas, é empírico. No caso do ensaio Marshall, os resultados obtidos em laboratório foram correlacionados com o desempenho dos revestimentos asfálticos e, portanto, seus testes em corpos-de-prova não podem ser usados para prever o sucesso ou o fracasso de um pavimento com absoluta certeza (HILLS, 1973).

Segundo, SHULER et al. (1992) em estudos com misturas asfálticas com cimentos asfálticos modificados, a estabilidade Marshall tendeu a aumentar em comparação às misturas de referência usadas na pesquisa, portanto, o autor considera que os parâmetros Marshall não esclarecem devidamente as diferenças entre os materiais usados.

3.3. Métodos

3.3.1. Processo de envelhecimento a curto prazo

O processo de envelhecimento a curto prazo de misturas asfálticas correspondente ao envelhecimento da mistura durante usinagem, aplicação e compactação. Esse processo foi simulado em laboratório seguindo as especificações da AASHTO (2001), que consiste basicamente em:

Preparar a mistura asfalto/agregado e coloca-la em uma bandeja de aço, solta e espalhada mantendo uma espessura entre 2,5 e 5,0 cm;

A bandeja, contendo a mistura, deverá ser levada a uma estufa ventilada por um período de 4 horas \pm 5 minutos a uma temperatura de 135 ± 3 °C;

Mexer a mistura a cada 60 minutos \pm 5 minutos para manter o processo de envelhecimento uniforme;

Após o período de envelhecimento (4 horas) retirar a mistura da estufa ventilada e moldar os corpos-de-prova;

O período de envelhecimento adotado (8 horas) foi realizado seguindo as mesmas especificações para o período de envelhecimento (4 horas), conforme AASHTO (2001).

3.3.2. Método de ensaio Marshall

O método de ensaio Marshall consiste basicamente na compactação de corpos-de-prova cilíndricos, sob condições padronizadas (ABNT, 1993), e na determinação de algumas características físicas e ruptura mediante compressão diametral desses corpos-de-prova. Do ensaio obtém-se a densidade aparente, o volume de vazios, a relação betume-vazios, a estabilidade, que corresponde à carga de ruptura, em N, e a fluência, que corresponde à deformação sofrida pelo corpo-de-prova na ruptura, em mm, e com os resultados desses valores determina-se o teor ótimo de trabalho do cimento asfáltico para mistura asfáltica.

Embora o método de ensaio Marshall vem sendo constantemente criticado, pelo seu empirismo, ele ainda é o método mais utilizado no Brasil e aceito no meio rodoviário, sendo utilizado em projetos de misturas asfálticas, tanto em pesquisas, quanto em obras de pavimentação asfáltica.

3.3.3. Ensaio de fluência por compressão uniaxial dinâmica

O ensaio consiste na compressão axial de um corpo-de-prova cilíndrico por meio da aplicação de cargas transientes por um período convencional. Através da fluência do corpo-de-prova obtém-se curvas de deslocamentos axiais em função do tempo.

Para a realização do ensaio de fluência por compressão uniaxial dinâmica utilizou-se uma prensa composta de um sistema pneumático para carregamento, um sistema computadorizado para leitura dos deslocamentos da amostra e de uma estrutura de suporte.

A prensa foi colocada em um ambiente fechado de madeira para que fosse possível a execução do ensaio sob condições de temperatura determinada, controlada através de dispositivo automático ligado a uma fonte de calor.

O sistema de leitura dos deslocamentos axiais da amostra é realizado através de dois *linear variable differential transducers* (LVDT's), colocados a 180°, figura 3.3, um em relação ao outro, a deformação média da amostra corresponde à média aritmética entre as leituras desses dois LVDT's.

O ensaio foi realizado sob uma tensão de 4 kgf/cm^2 ($0,4 \text{ MPa}$), sugerida por LITTLE et al. (1993), por ser relativamente alta e que representa uma tensão média no centro de uma camada asfáltica encontrada em condições reais de campo. Para a realização do ensaio são aplicados 5000 ciclos de carga no corpo-de-prova; cada ciclo de carregamento adotado é de 1 segundo, sendo 0,1 segundo de carregamento e 0,9 segundo de repouso.

A temperatura de ensaio foi de $40 \text{ }^\circ\text{C}$, pois além de ser um valor corrente na literatura consultada, é um valor próximo das condições climáticas brasileiras. Antes de iniciar o ensaio é realizado um pré-condicionamento do corpo-de-prova mediante a aplicação de 200 ciclos com a carga de ensaio.

O controle do ensaio foi feito através de um programa computacional que executa as leituras de deslocamentos (através de LVDT's) e de carga (através da célula de carga) ao longo do tempo, que são gravados no disco rígido do computador.

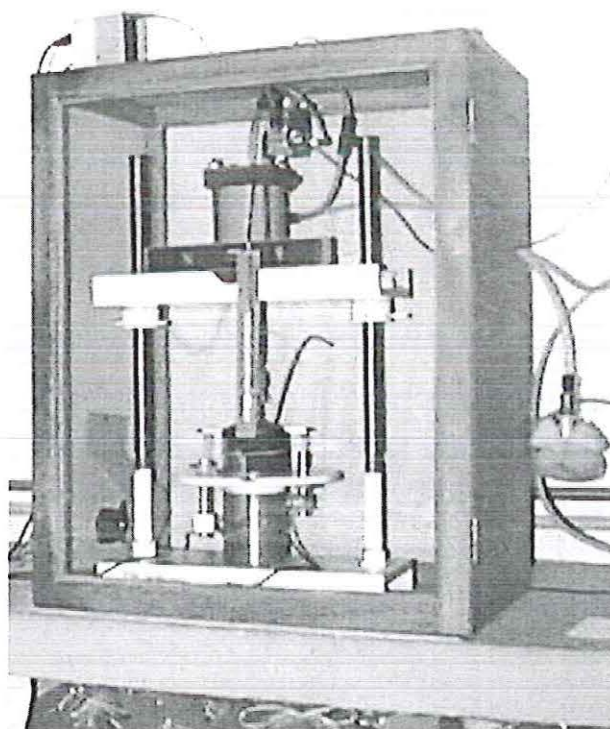


Figura 3.3. Exemplo do posicionamento dos LVDT's (180°).

3.3.4. Ensaio de resistência à tração por compressão diametral

Esse ensaio permite determinar a resistência à tração de corpos-de-prova cilíndricos de misturas asfálticas, por meio do ensaio de compressão diametral, consistindo na aplicação progressiva da carga até a ruptura, por separação das duas metades do corpo-de-prova, segundo o plano diametral vertical.

No Brasil, o ensaio de compressão diametral está normalizado segundo método de ensaio (DNER ME 138/94). Procede-se da seguinte forma:

medir altura (H) do corpo-de-prova com paquímetro, em quatro posições diametralmente opostas. Adotar como altura o valor da média aritmética das quatro leituras;

medir o diâmetro (D) do corpo-de-prova com paquímetro, em três posições paralelas. Adotar como diâmetro o valor da média aritmética das três leituras;

colocar o corpo-de-prova na estufa ou sistema de refrigeração, por um período de duas horas, de modo a se obter a temperatura especificada para o ensaio, 25 °C, 30 °C, 45 °C ou 60 °C;

ajustar os pratos da prensa até que seja obtida uma leve compressão, capaz de manter em posição o corpo-de-prova;

aplicar a carga progressivamente, com uma velocidade de deformação de $0,8 \pm 0,1$ mm/s, até que se dê a ruptura, por separação da duas metades do corpo-de-prova, segundo o plano diametral vertical.

com o valor obtido, da carga de ruptura, é calculada a resistência à tração do corpo-de-prova rompido por compressão diametral, através da expressão 3.11;

$$\sigma_R = \frac{2F}{\pi DH} \quad (3.11)$$

Onde:

σ_R = resistência à tração, em kgf/cm²;

F = carga de ruptura, em kgf;

D = diâmetro do corpo-de-prova, em cm;

H = altura do corpo-de-prova, em cm.

A temperatura usualmente utilizada no ensaio é de 25 °C.

3.3.5. Ensaio de módulo de resiliência por compressão diametral dinâmica

Segundo DNER (1994), “o módulo de resiliência de misturas betuminosas é a relação entre a tensão (σ_t) aplicada repetidamente no plano diametral vertical de uma amostra cilíndrica de mistura betuminosa e a deformação específica recuperável (ε_t) correspondente à tensão aplicada, numa temperatura (T).”

$$MR = \left(\frac{\sigma_t}{\varepsilon_t} \right)_T \quad (3.12)$$

O ensaio foi realizado à temperatura de 25 °C, por ser a temperatura mais usual encontrada na literatura consultada.

Uma carga de magnitude fixa foi utilizada no ensaio, aplicada em um período de 0,1 segundo com um período de repouso de 0,9 segundo, totalizando um ciclo de 1 segundo de duração, sendo aplicado um total de 500 ciclos por corpo-de-prova. A carga foi aplicada através de dois frisos metálicos com uma superfície de contato côncava.

Um pré-condicionamento do corpo-de-prova é realizado mediante a aplicação de 200 ciclos com a carga de ensaio repetida diametralmente capaz de obter uma tensão (σ_t) menor ou igual a 30% da resistência a tração determinada no ensaio de compressão diametral estático.

O controle do ensaio foi feito através de um programa computacional que executa as leituras de deslocamentos (através de LVDT's) e de carga (através da célula de

carga) ao longo do tempo, que são gravados no disco rígido do computador. No Brasil, o ensaio de módulo de resiliência está normalizado segundo o método de ensaio (DNER ME 133/94) apresentando o procedimento para a realização desse ensaio, como a seguir:

posicionar o corpo-de-prova no interior do suporte para fixação dos transdutores;

colocar o corpo-de-prova na base da estrutura de suporte, entre dois cabeçotes curvos;

fixar e ajustar os transdutores de modo a se obter o registro dos deslocamentos;

observar o perfeito assentamento do pistão de carga e dos cabeçotes no corpo-de-prova;

aplicar a carga;

com os valores obtidos são calculados os módulos de resiliência, por meio da expressão 3.13. O módulo de resiliência do corpo de prova ensaiado será a média aritmética dos valores determinados a 300, 400 e 500 aplicações de carga.

$$MR = \frac{F}{\Delta H} \cdot (0,9976\mu + 0,2692) \quad (3.13)$$

Onde:

MR = módulo de resiliência, em kgf/cm²;

F = carga vertical repetida aplicada diametralmente no corpo-de-prova, em kgf;

Δ = deformação resiliente para 300, 400 e 500 ciclos, em cm

H = altura do corpo-de-prova, em cm;

μ = coeficiente de Poisson, sendo recomendado 0,30.

CAPÍTULO 4: APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

4.1. Introdução

Neste capítulo são apresentados os resultados dos ensaios Marshal, fluência por compressão uniaxial dinâmica, resistência à tração por compressão diametral e módulo de resiliência por compressão diametral dinâmica.

Do ensaio Marshall são apresentados os valores de densidade aparente (D_a), volume de vazios (V_v), relação betume-vazios (RBV), fluência (F) e estabilidade (E), em função do teor de asfalto. Estes resultados referem-se, sempre, ao valor médio obtido para os três corpos-de-prova moldados no mesmo teor de cimento asfáltico.

Do ensaio de fluência por compressão uniaxial dinâmica, realizados à temperatura de 40 °C, são apresentados os valores de deformação total, correspondente à deformação no final dos 5000 pulsos do referido ensaio, a inclinação, correspondente à inclinação da curva de fluência para os pulsos entre 100 e 5000 e módulo de fluência, correspondente à relação entre a tensão aplicada no ensaio e a deformação total correspondente ao corpo-de-prova.

Do ensaio de resistência à tração por compressão diametral apresentam-se os resultados de resistência à tração das misturas asfálticas estudadas, para a temperatura de 25 °C, para realização deste ensaio foi utilizado apenas um corpo-de-prova para cada condição.

No ensaio de módulo de resiliência por compressão diametral dinâmica são obtidos os valores de módulo de resiliência para as misturas estudadas, para a temperatura de 25 °C.

4.2. Ensaio Marshall

As tabelas 4.1, 4.2 e 4.3 apresentam os valores médios obtidos nos ensaios Marshall para as misturas moldadas com cimento asfáltico convencional, cimento asfáltico modificado com polímero e cimento asfáltico modificado com borracha, respectivamente.

As figuras 4.1, 4.5 apresentam os gráficos de densidade aparente (D_a), volume de vazios (V_v), relação betume-vazios (RBV), fluência (F) e estabilidade (E), em função do teor de asfalto para as três misturas.

Tabela 4.1. Resultados do ensaio Marshall para a mistura de referência (CAP 20).

Teor (%)	D_a (g/cm ³)	V_v (%)	RBV (%)	F (mm)	E (N)	VAM (%)
4,5	2,490	6,26	63,6	3,1	16388	17,20
5,0	2,497	5,22	70,0	3,2	17997	17,41
5,5	2,509	3,98	77,2	3,6	20153	17,46
6,0	2,499	3,56	80,4	3,9	15077	18,20
6,5	2,492	3,04	83,9	4,2	13191	18,86

Tabela 4.2. Resultados do ensaio Marshall para mistura modificada com polímero.

Teor (%)	D_a (g/cm ³)	V_v (%)	RBV (%)	F (mm)	E (N)	VAM (%)
4,5	2,488	6,33	63,4	3,6	14906	17,26
5,0	2,498	5,17	70,2	3,7	17486	17,36
5,5	2,510	3,92	77,5	4,0	21521	17,40
6,0	2,505	3,34	81,5	4,2	19899	18,01
6,5	2,499	2,79	85,0	5,1	16250	18,65

Tabela 4.3. Resultados do ensaio Marshall para mistura modificada com borracha.

Teor (%)	Da (g/cm ³)	Vv (%)	RBV (%)	F (mm)	E (N)	VAM (%)
4,5	2,471	6,95	61,0	3,2	11316	17,83
5,0	2,496	5,21	70,1	3,5	14271	17,42
5,5	2,506	4,05	76,9	3,9	15228	17,53
6,0	2,491	3,85	79,2	4,3	11760	18,47
6,5	2,474	3,74	80,8	4,6	9037	19,47

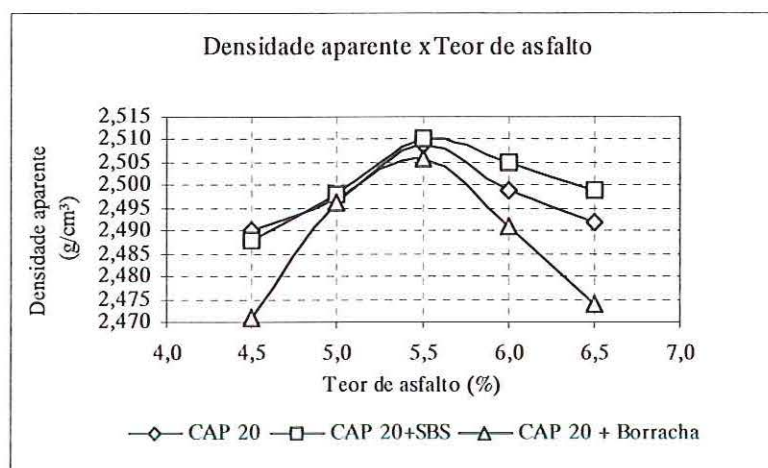


Figura 4.1. Densidade aparente em função do teor de cimento asfáltico.

Quanto à densidade aparente das misturas asfálticas, observa-se uma diminuição destes valores na mistura contendo borracha. No ponto correspondente ao teor ótimo de cimento asfáltico, a densidade aparente das misturas, convencional e contendo polímero, apresentam valores praticamente idênticos, enquanto a mistura contendo borracha acompanha a tendência notada anteriormente. Provavelmente este fato pode estar ligado a maior viscosidade da mistura modificada com borracha prejudicando a compactação da mistura.

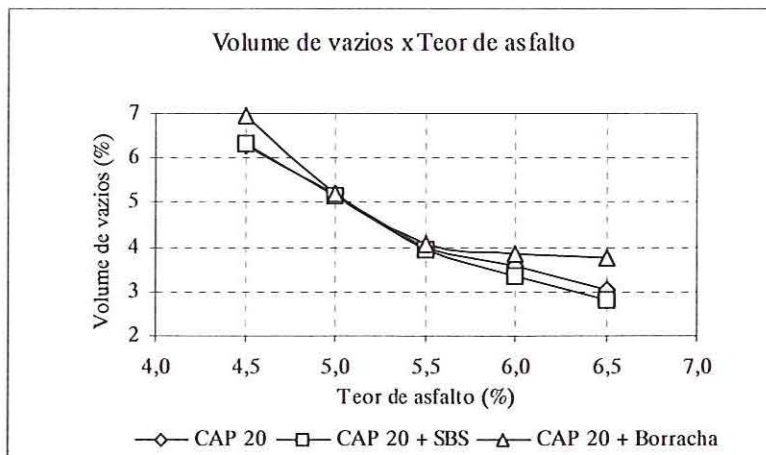


Figura 4.2. Volume de vazios em função do teor de cimento asfáltico.

Analisando o gráfico de volume de vazios versus teor de asfalto, observa-se que a mistura contendo borracha apresenta valores maiores para um mesmo teor de asfalto, exceto para os teores de 5,0% e 5,5%, onde estes valores são praticamente idênticos para as três misturas.

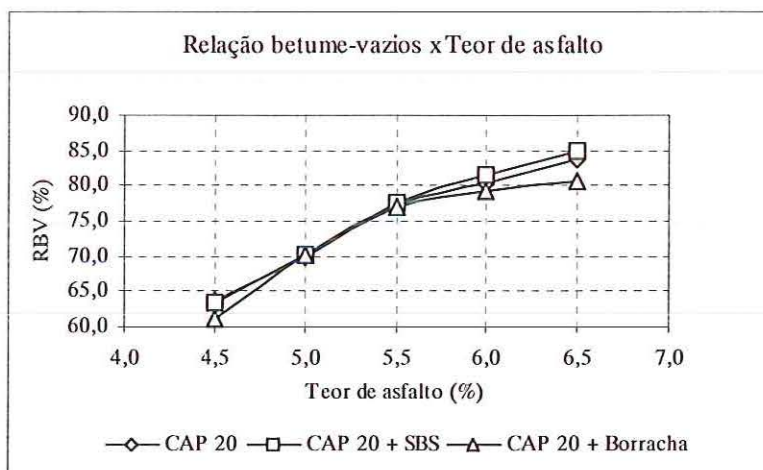


Figura 4.3. Relação betume-vazios em função do teor de cimento asfáltico.

Analisando a figura acima nota-se uma igualdade nos valores da relação betume-vazios, apresentando um ligeiro aumento desses valores para a misturas modificadas com polímero a partir do teor ótimo de cimento asfáltico, e uma diminuição nos valores da mistura modificada com borracha a partir do teor ótimo.

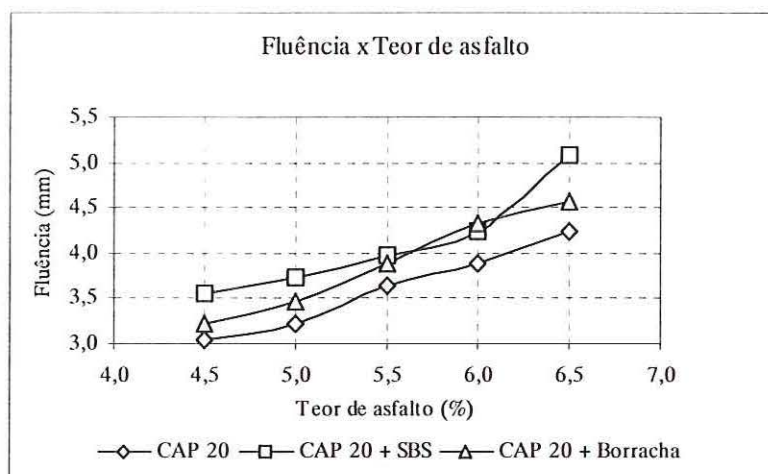


Figura 4.4. Fluência em função do teor de cimento asfáltico.

Com relação à fluência, ocorre um aumento com a adição de polímero SBS e borracha reciclada de pneu, sendo, este aumento, mais acentuado para a mistura modificada com polímero.

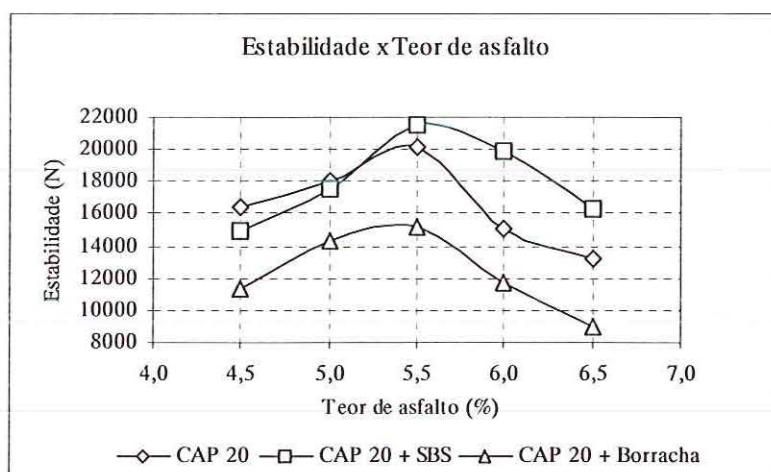


Figura 4.5. Estabilidade em função do teor de cimento asfáltico.

A adição de borracha promove queda da estabilidade em relação à mistura convencional, como pode ser visto através da figura 4.5, fato que não ocorre com a adição de polímero, que apresenta um aumento a partir do teor ótimo de cimento asfáltico. A NBR 12891 (ABNT, 1993) recomenda que o teor ótimo de cimento asfáltico seja obtido em função da média aritmética dos teores obtidos para a máxima estabilidade (E), máxima densidade aparente (D_a), valor médio obtido para

porcentagem de volume de vazios (Vv) entre 3% e 5%, valor médio para relação betume-vazios (RBV) entre 75% e 82% e valor médio para fluência entre 2,0 mm e 4,5 mm. Neste trabalho foi adotado um teor ótimo de cimento asfáltico para o volume de vazios igual a 4%.

A tabela 4.4 apresenta os valores dos teores ótimos para as três misturas asfálticas, obtidas para o volume de vazios igual a 4%, e os valores dos parâmetros Marshall correspondentes, segundo NBR 12891 (ABNT, 1993).

Tabela 4.4. Teores ótimos para as três misturas asfálticas.

	CAP 20	CAP 20 + SBS	CAP 20 + Borracha
Teor ótimo de asfalto (%)	5,5	5,5	5,6
Densidade aparente (g/cm ³)	2,509	2,510	2,506
Volume de vazios (%)	4,00	4,00	4,00
Relação betume-vazios (%)	77,2	77,5	76,9
Fluência Marshall (mm)	36,4	39,8	38,9
Estabilidade Marshall (N)	20153	21521	15228

De acordo com os valores de teores ótimos apresentados na tabela 4.4, pode-se observar que para o valor de volume de vazios igual a 4%, a mistura asfáltica contendo cimento asfáltico modificado com borracha apresentou o teor ótimo maior que as demais misturas. Neste caso, foi adotado o teor ótimo de 5,5%, já que, para esta pesquisa os teores ótimos obtidos nos ensaios Marshall serviram como base para a determinação dos teores de trabalho.

4.3. Ensaio de fluência por compressão uniaxial dinâmica

As tabelas 4.5 E 4.6 apresentam os resultados de deformação total e inclinação média da curva de deformação para as misturas preparadas com cimento asfáltico convencional, cimento asfáltico modificado com polímero e cimento asfáltico modificado com borracha submetidas ao processo de envelhecimento a curto prazo por um período de 0, 4 e 8 horas. As figuras 4.6 a 4.17 apresentam uma comparação dos valores médios da deformação total e inclinação média das misturas, em cada condição de envelhecimento a curto prazo. As tabelas 4.7 e 4.8 apresentam os

resultados do tratamento estatístico adotado neste trabalho para os resultados de deformação total. As tabelas 4.9 e 4.10 apresentam os resultados do tratamento estatístico para os resultados de inclinação média da curva de deformação.

Tabela 4.5. Resultados médios de deformação total para as misturas submetidas ao processo de envelhecimento a curto prazo.

Teor %	Deformação Total média (%)								
	Sem envelhecimento			Envelhecimento 4 horas			Envelhecimento 8 horas		
	Convenc.	Polímero	Borracha	Convenc.	Polímero	Borracha	Convenc.	Polímero	Borracha
5.00	0.425	0.233	0.102	0.432	0.297	0.100	0.220	0.256	0.096
5.50	0.123	0.302	0.192	0.587	0.463	0.178	0.642	0.506	0.147
6.00	0.143	0.378	0.358	0.139	0.430	0.122	0.424	0.239	0.071
6.50	0.433	0.438	0.106	0.418	0.176	0.213	0.404	0.181	0.065

Tabela 4.6. Resultados médios de inclinação (taxa de deformação) para as misturas submetidas ao processo de envelhecimento a curto prazo.

Teor %	Inclinação média								
	Sem envelhecimento			Envelhecimento 4 horas			Envelhecimento 8 horas		
	Convenc.	Polímero	Borracha	Convenc.	Polímero	Borracha	Convenc.	Polímero	Borracha
5.00	2.62E-05	1.38E-05	8.60E-06	4.22E-05	2.83E-05	9.31E-06	2.23E-05	2.34E-05	8.95E-06
5.50	9.75E-06	2.77E-05	1.26E-05	5.42E-05	3.67E-05	1.70E-05	6.06E-05	4.47E-05	1.40E-05
6.00	1.08E-05	3.21E-05	2.37E-05	1.14E-05	3.36E-05	1.17E-05	4.17E-05	2.03E-05	6.44E-06
6.50	1.55E-05	3.45E-05	8.80E-06	4.15E-05	1.66E-05	2.08E-05	3.88E-05	1.88E-05	6.20E-06

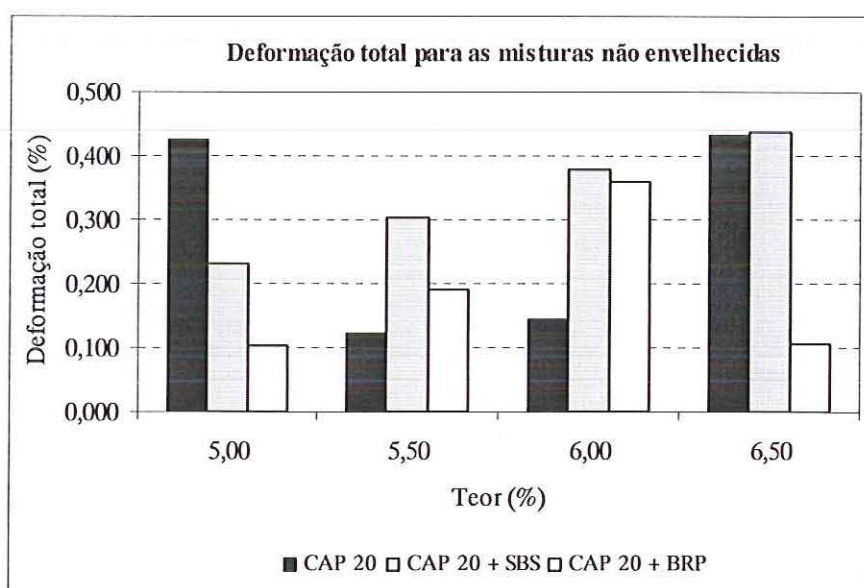


Figura 4.6. Deformação total média no ensaio de compressão uniaxial dinâmica para as misturas não envelhecidas.

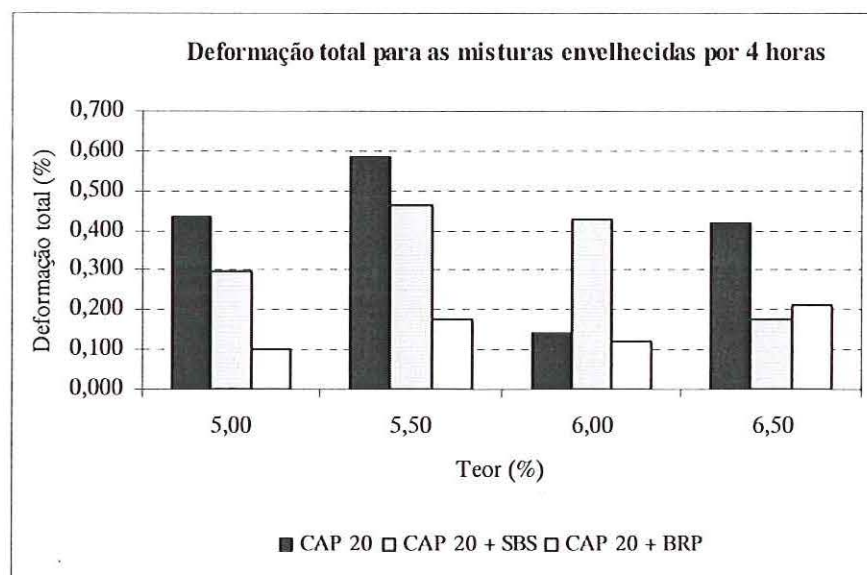


Figura 4.7. Deformação total média no ensaio de compressão uniaxial dinâmica para as misturas envelhecidas a curto prazo por um período de 4 horas.

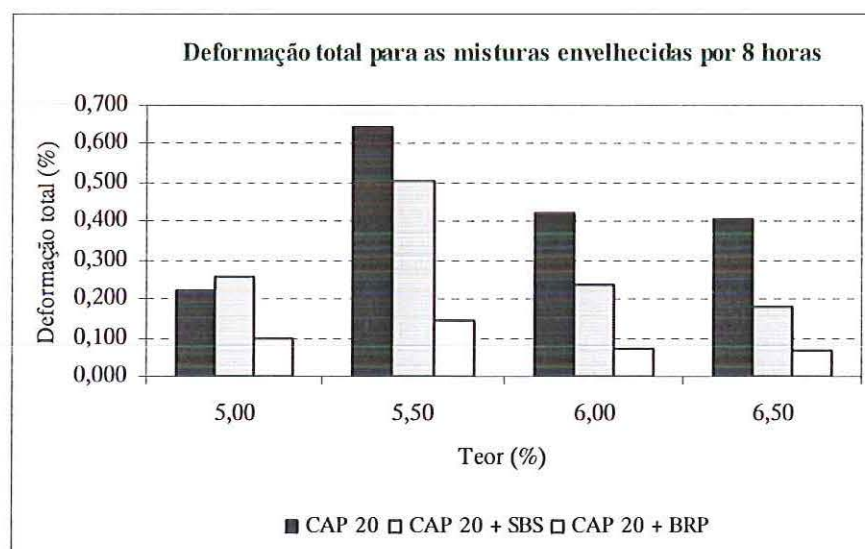


Figura 4.8. Deformação total média no ensaio de compressão uniaxial dinâmica para as misturas envelhecidas a curto prazo por um período de 8 horas.

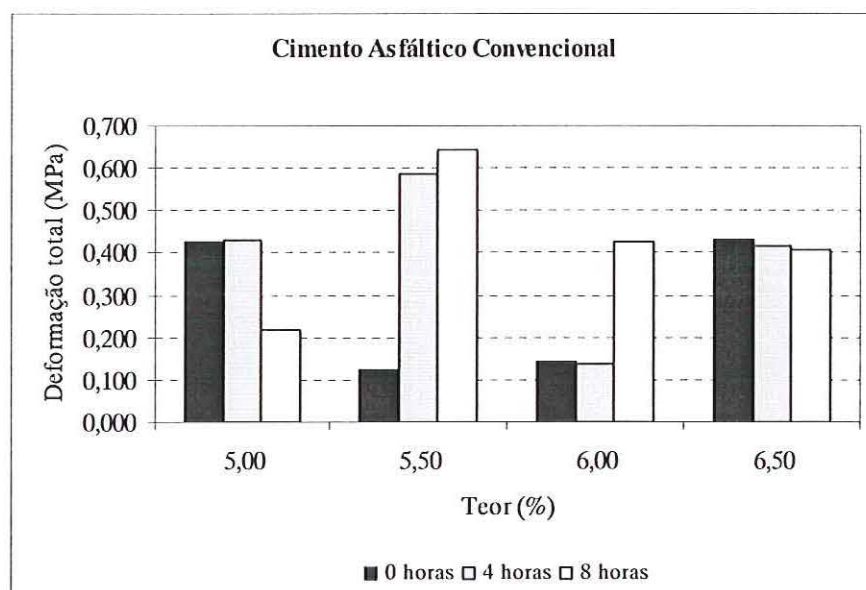


Figura 4.9. Deformação total média no ensaio de compressão uniaxial dinâmica para as misturas moldadas com cimento asfáltico convencional submetidas ao envelhecimento a curto prazo.

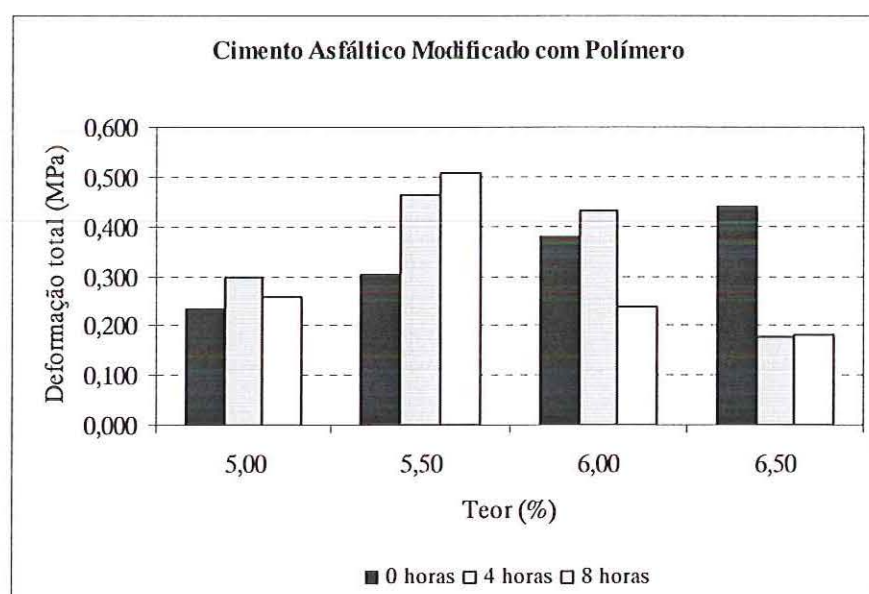


Figura 4.10. Deformação total média no ensaio de compressão uniaxial dinâmica para as misturas moldadas com cimento asfáltico modificado com polímero submetidas ao envelhecimento a curto prazo.

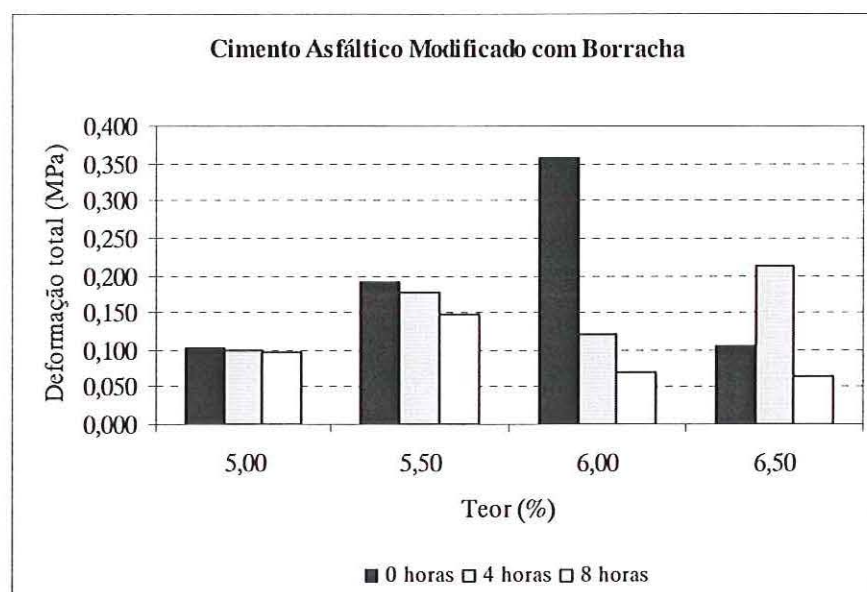


Figura 4.11. Deformação total média do ensaio de compressão uniaxial dinâmica para as misturas moldadas com cimento asfáltico modificado com borracha submetidas ao envelhecimento a curto prazo.

As deformações totais médias obtidas no ensaio de fluência por compressão uniaxial dinâmica para as misturas asfálticas submetidas ao processo de envelhecimento a curto prazo por um período de 0 horas, figura 4.6, não definem claramente qual mistura apresenta melhor desempenho. Para as misturas asfálticas submetidas ao processo de envelhecimento a curto prazo por um período de 4 e 8 horas, conforme figuras 4.7 e 4.8, a mistura moldada com cimento asfáltico modificado com borracha apresenta um melhor desempenho em relação as demais misturas.

As misturas asfálticas moldadas com cimento asfáltico convencional, figura 4.9, e cimento asfáltico modificado com polímero, figura 4.10, não apresentam um desempenho claro quando submetidas ao processo de envelhecimento a curto prazo. Já as misturas asfálticas moldadas com cimento asfáltico modificado com borracha, figura 4.11, apresentam melhor desempenho com relação à deformação total média quando submetidas ao processo de envelhecimento a curto prazo por um período de 8 horas.

Tabela 4.7. Resultados da Análise de Variância para deformação total para um nível de significância 5%.

Fonte de Variação	F_0	$F_{0,05}$ (tabela)	Influência
A	3,33	2,73	sim
B	1,04	3,12	não
C	28,21	3,12	sim
AB	3,57	2,22	sim
AC	2,94	2,22	sim
BC	2,25	2,50	não

A – Teor de cimento asfáltico.

B – Período de envelhecimento a curto prazo.

C – Tipo de cimento asfáltico.

Tabela 4.8. Resultados da Análise de Variância para deformação total para um nível de significância 1%.

Fonte de Variação	F_0	$F_{0,01}$ (tabela)	Influência
A	3,33	4,06	não
B	1,04	4,90	não
C	28,21	4,90	sim
AB	3,57	3,06	sim
AC	2,94	3,06	não
BC	2,25	3,58	não

A – Teor de cimento asfáltico.

B – Período de envelhecimento a curto prazo.

C – Tipo de cimento asfáltico.

A tabela 4.7 apresenta os resultados da análise de variância para um nível de significância de 5% para deformação total média. Esses resultados mostram que apenas o fator “B” e a combinação entre os fatores “B” e “C” não têm influência significativa nos resultados de deformação total, ou seja, com esse nível não podemos tirar grandes conclusões sobre a influência dos fatores estudados.

A tabela 4.8 apresenta os resultados da análise de variância para um nível de significância de 1% para deformação total média. Através desses resultados conclui-se que apenas o fator “C” e a combinação entre os fatores “A” e “B” influenciam

significativamente nos resultados de deformação total média das misturas estudadas. Também observa-se, que o fator “C” apresenta o maior grau de influência, $F_0 = 28,21$, com relação a combinação entre os fatores “A” e “B”, $F_0 = 3,57$.

De acordo com o tratamento estatístico adotado neste trabalho, Análise de Variância, o tipo de cimento asfáltico tem influência significativa nos resultados das deformações totais obtidos, o que não ocorre para o período de envelhecimento que as misturas foram submetidas e o teor de cimento asfáltico. A combinação entre o teor de asfalto e o período de envelhecimento é um outro fator que também apresenta influência significativa no desempenho das misturas asfálticas estudadas.

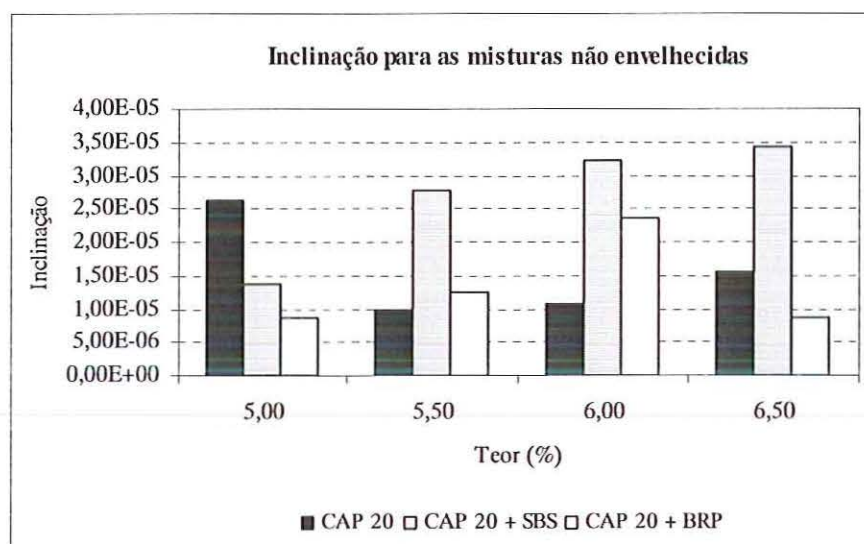


Figura 4.12. Inclinação média (taxa de deformação) no ensaio de compressão uniaxial dinâmica para as misturas não envelhecidas.

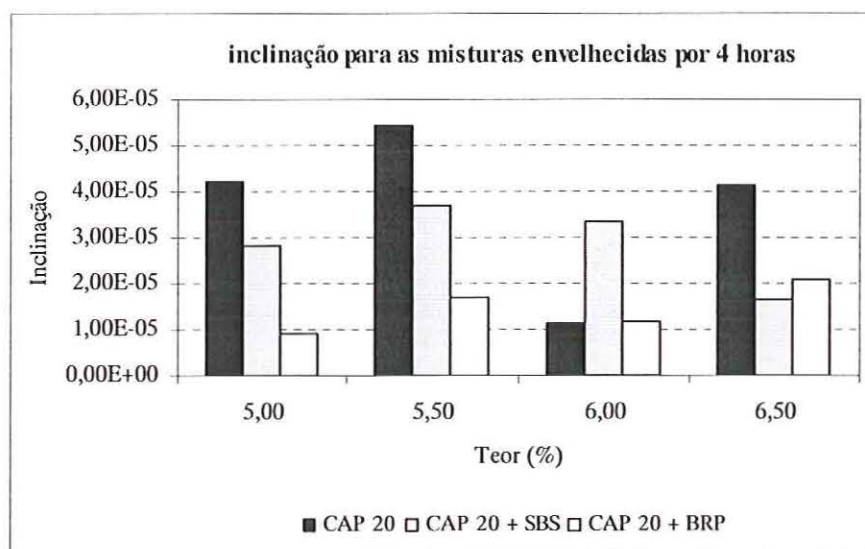


Figura 4.13. Inclinação media (taxa de deformação) no ensaio de compressão uniaxial dinâmica para as misturas envelhecidas a curto prazo por um período de 4 horas.

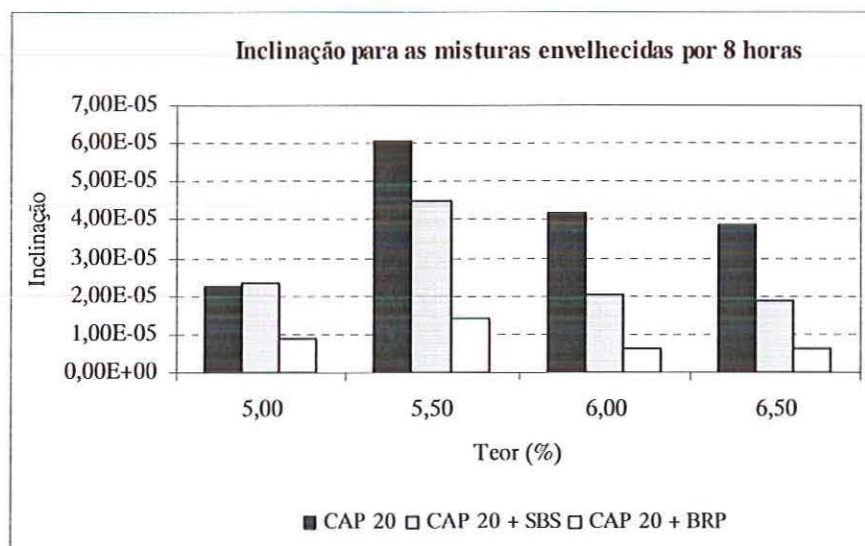


Figura 4.14. Inclinação media (taxa de deformação) no ensaio de compressão uniaxial dinâmica para as misturas envelhecidas a curto prazo por um período de 8 horas.

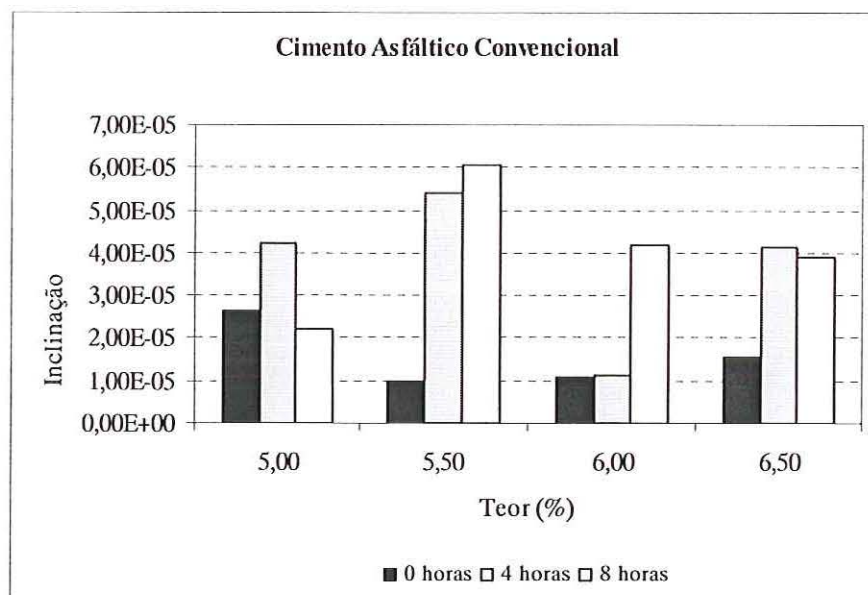


Figura 4.15. Inclinação média (taxa de deformação) no ensaio de compressão uniaxial dinâmica para as misturas moldadas com cimento asfáltico convencional submetidas ao envelhecimento a curto prazo.

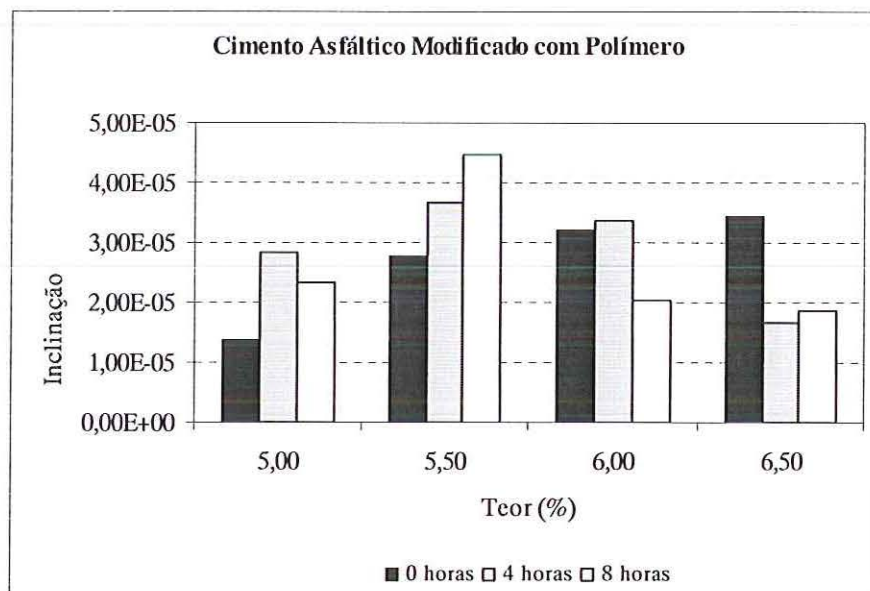


Figura 4.16. Inclinação média (taxa de deformação) no ensaio de compressão uniaxial dinâmica para as misturas moldadas com cimento asfáltico modificado com polímero submetidas ao envelhecimento a curto prazo.

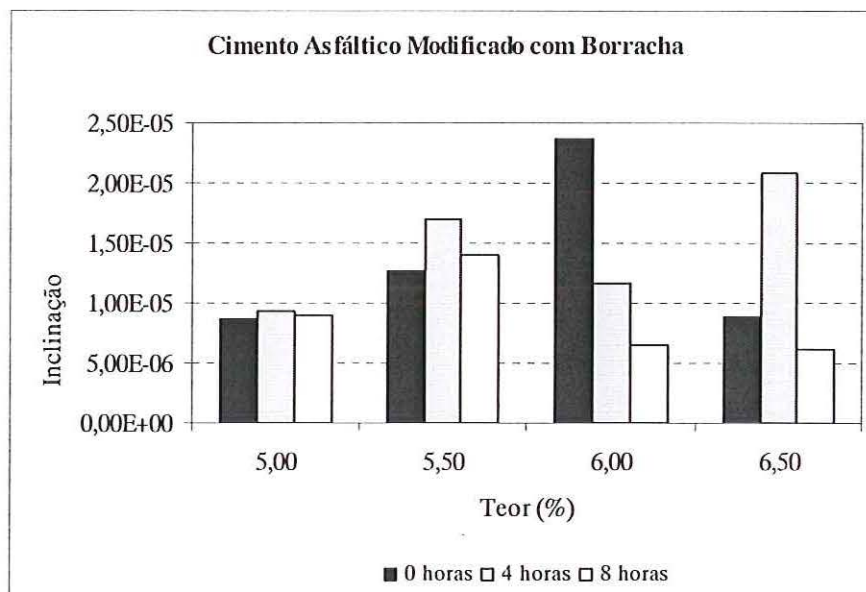


Figura 4.17. Inclinação média (taxa de deformação) no ensaio de compressão uniaxial dinâmica para as misturas moldadas com cimento asfáltico modificado com borracha submetidas ao envelhecimento a curto prazo.

No processo de envelhecimento a curto prazo por um período de 0 horas, a mistura asfáltica moldada com cimento asfáltico modificado com polímero apresentou os maiores valores para os resultados de inclinação média, figura 4.12. A mistura asfáltica moldada com cimento asfáltico convencional apresentou os maiores valores de inclinação média, em relação as demais misturas asfálticas, quando submetidas ao processo de envelhecimento a curto prazo por um período de 4 horas, figura 4.13, e 8 horas, figura 4.14.

De um modo geral todas as misturas aqui estudadas apresentaram os maiores valores para o resultado do ensaio de inclinação média quando submetidas ao processo de envelhecimento a curto prazo por um período de 4 e 8 horas, figuras 4.15, 4.16 e 4.17.

Tabela 4.9. Resultados da Análise de Variância para inclinação média no ensaio de compressão axial dinâmica para um nível de significância 5%.

Fonte de Variação	F_0	$F_{0,05}$ (tabela)	Influência
A	3,59	2,73	sim
B	5,69	3,12	sim
C	27,89	3,12	sim
AB	2,72	2,22	sim
AC	1,87	2,22	não
BC	4,77	2,50	sim

A – Teor de cimento asfáltico.

B – Período de envelhecimento a curto prazo.

C – Tipo de cimento asfáltico.

Tabela 4.10. Resultados da Análise de Variância para inclinação média no ensaio de compressão axial dinâmica para um nível de significância 1%.

Fonte de Variação	F_0	$F_{0,01}$ (tabela)	Influência
A	3,59	4,06	não
B	5,69	4,90	sim
C	27,89	4,90	sim
AB	2,72	3,06	não
AC	1,87	3,06	não
BC	4,77	3,58	sim

A – Teor de cimento asfáltico.

B – Período de envelhecimento a curto prazo.

C – Tipo de cimento asfáltico.

A tabela 4.9 apresenta os resultados de análise de variância para um nível de significância de 5% para inclinação média da curva de deformação. Esses resultados mostram apenas a combinação entre os fatores “A” e “C” não influenciam nos resultados de inclinação média.

A tabela 4.10 apresenta os resultados de análise de variância para um nível de significância de 1% para inclinação média da curva de deformação. De posse desses resultados conclui-se que os fatores “B” e “C” e a combinação entre esses fatores influenciam significativamente nos resultados da inclinação média das misturas estudadas, verifica-se também que o fator “C” tem o maior grau de influência, $F_0 =$

27,89 com relação ao fator “B”, $F_0 = 5,69$, e a combinação entre os fatores “B” e “C”, $F_0 = 4,77$.

Analisando estatisticamente os fatores período de envelhecimento e tipo de cimento asfáltico têm influência significativa no desempenho das misturas estudadas com relação à inclinação média, fato que também ocorre para a combinação entre esses dois fatores. Diferentemente da conclusão obtida com relação às deformações totais médias, fica evidenciado estatisticamente que o período de envelhecimento e o tipo de cimento asfáltico influem significativamente no desempenho das misturas com relação à inclinação.

4.4. Ensaio de Resistência à Tração por Compressão Diametral

As tabelas 4.11 a 4.13 e as figuras 4.18 a 4.23 apresentam os resultados do ensaio de resistência à tração para as misturas asfálticas submetidas ao processo de envelhecimento a curto prazo, obtidos no ensaio de compressão diametral, a uma temperatura de ensaio de 25 °C.

Tabela 4.11. Resultados do ensaio de tração indireta para as misturas não envelhecidas.

Teor %	Resistência à tração (MPa) (Temperatura - 25 °C)		
	Período de envelhecimento (0 horas)		
	Asfalto convencional	Asfalto polímero	Asfalto borracha
5,00	2,03	2,22	1,65
5,50	2,24	2,67	2,00
6,00	1,76	2,46	2,29
6,50	1,82	2,11	1,71

Tabela 4.12. Resultados do ensaio de tração indireta para as misturas envelhecidas por um período de 4 horas.

Teor %	Resistência à tração (MPa) (Temperatura - 25 °C) Período de envelhecimento (4 horas)		
	Asfalto convencional	Asfalto polímero	Asfalto borracha
	5,00	1,97	2,35
5,50	2,35	2,56	2,16
6,00	2,18	2,87	2,30
6,50	1,71	2,25	2,39

Tabela 4.13. Resultados do ensaio de tração indireta para as misturas envelhecidas por um período de 8 horas.

Teor %	Resistência à tração (MPa) (Temperatura - 25 °C) Período de envelhecimento (8 horas)		
	Asfalto convencional	Asfalto polímero	Asfalto borracha
	5,00	2,08	2,19
5,50	2,47	2,64	2,17
6,00	2,13	2,87	2,25
6,50	2,17	2,45	2,19

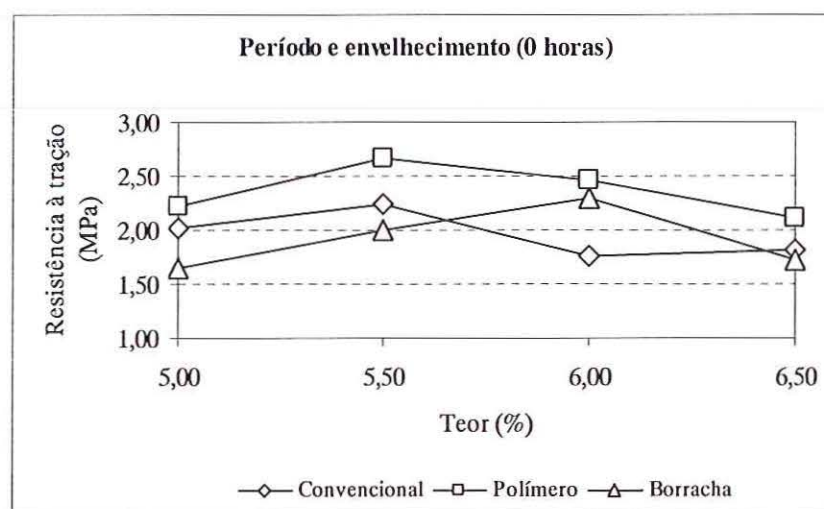


Figura 4.18. Resistência à tração para as misturas asfálticas submetidos ao envelhecimento a curto prazo por um período de 0 horas.

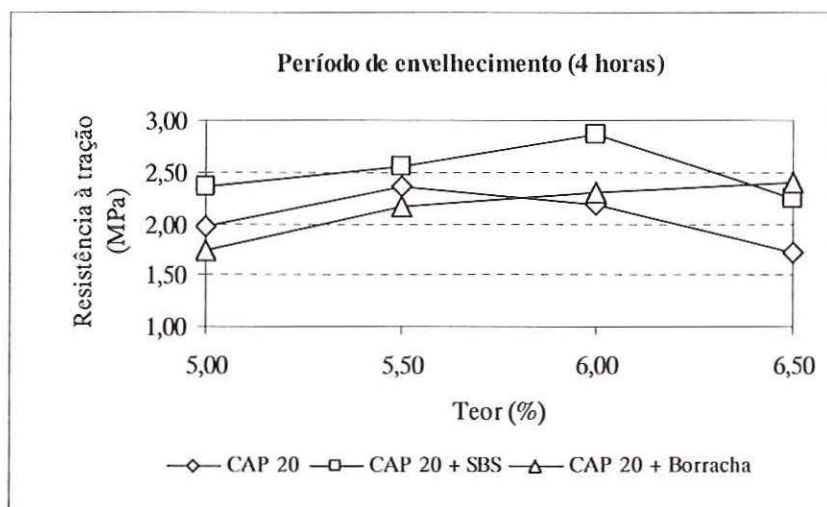


Figura 4.19. Resistência à tração para as misturas asfálticas submetidas ao envelhecimento a curto prazo por um período de 4 horas.

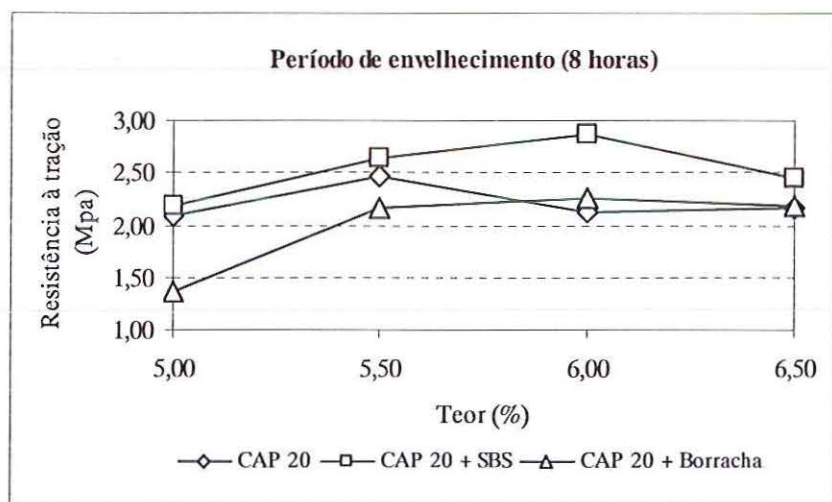


Figura 4.20. Resistência à tração para as misturas asfálticas submetidas ao envelhecimento a curto prazo por um período de 8 horas.

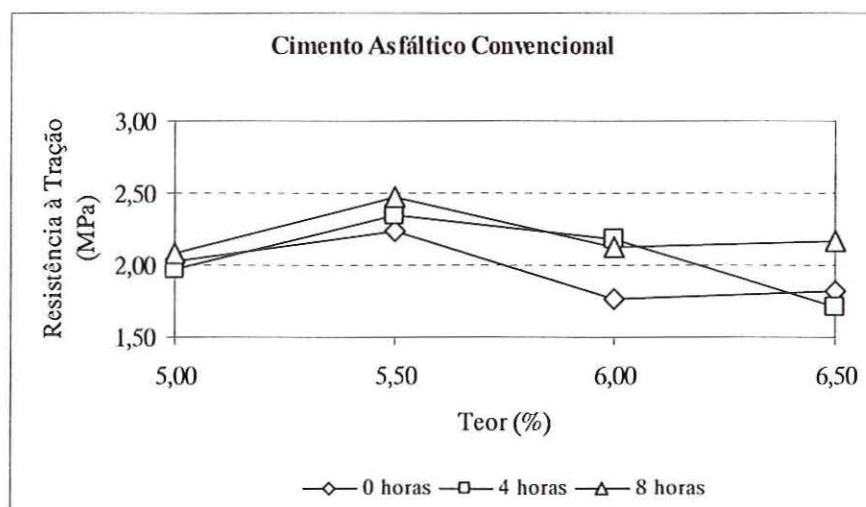


Figura 4.21. Resistência à tração para as misturas asfálticas moldadas com cimento asfáltico convencional submetidas ao envelhecimento a curto prazo.

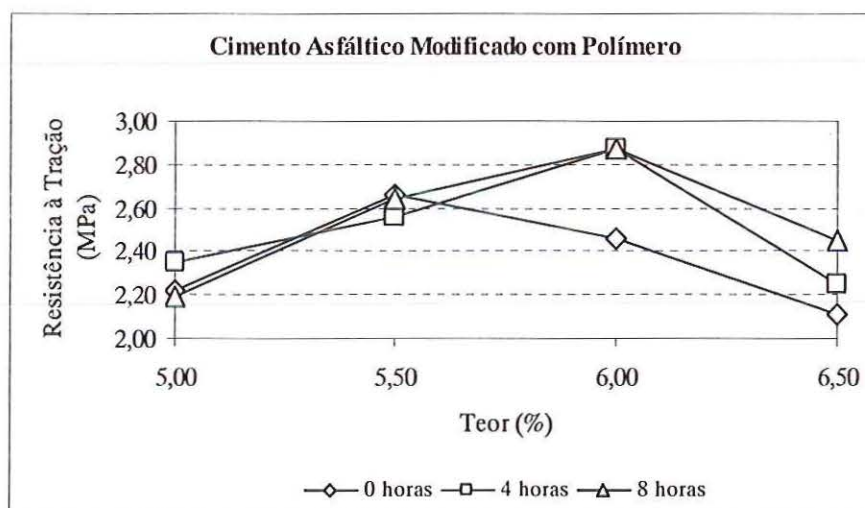


Figura 4.22. Resistência à tração para as misturas asfálticas moldadas com cimento asfáltico modificado com polímero submetidas ao envelhecimento a curto prazo.

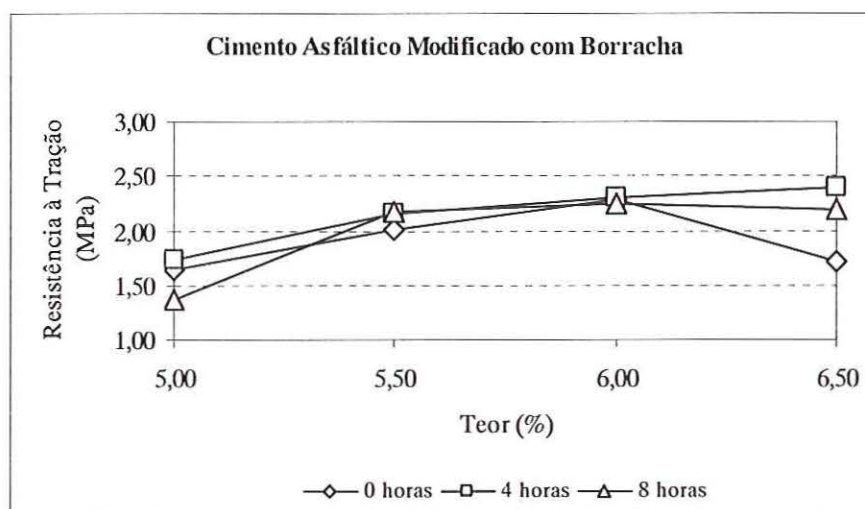


Figura 4.23. Resistência à tração para as misturas asfálticas moldadas com cimento asfáltico modificado com borracha submetidas ao envelhecimento a curto prazo.

De acordo com as figuras 4.18, 4.19 e 4.20 a mistura asfáltica moldada com cimento asfáltico modificado com polímero apresentou os maiores resultados para o ensaio de resistência à tração. Comparando os tipos de cimentos com teor de cimento asfáltico para os três períodos de envelhecimento a curto prazo as figuras 4.21, 4.22 e 4.23, mostram que aumentando o período de envelhecimento a curto prazo das misturas asfálticas aumento os valores dos resultados do ensaio de resistência à tração. A mistura asfáltica moldada com cimento asfáltico modificado com borracha, figura 4.23, contraria esta tendência, apresentando resultados maiores para resistência à tração para o período de envelhecimento a curto prazo por 4 horas, principalmente para os teores 5,0% e 6,5%.

4.5. Ensaio de Módulo de Resiliência por Compressão Diametral

O ensaio de módulo de resiliência por compressão diametral dinâmica foi realizado para as misturas convencionais, modificada com polímero e modificada com borracha submetidas ao processo de envelhecimento a curto prazo pelos período de zero, quatro e oito horas. A temperatura de ensaio adotada é de 25 °C. As tabelas

4.14 a 4.16 e as figuras 4.24 a 4.29 apresentam os resultados deste ensaio. As tabelas 4.17 e 4.18 apresentam os resultados do tratamento estatístico para os resultados do ensaio de módulo de resiliência.

Tabela 4.14. Resultados do ensaio de módulo de resiliência para as misturas envelhecidas por 0 horas.

Teor %	Módulo de Resiliência (Mpa)		
	Temperatura de ensaio 25 °C		
	Período de envelhecimento 0 horas		
	Asfalto Convencional	Asfalto Polímero	Asfalto Borracha
5,0	6861	5984	2765
5,5	5790	5492	2189
6,0	4918	4293	2207
6,5	4181	3492	1391

Tabela 4.15. Resultados do ensaio de módulo de resiliência para as misturas envelhecidas por 4 horas.

Teor %	Módulo de Resiliência (Mpa)		
	Temperatura de ensaio 25 °C		
	Período de envelhecimento 4 horas		
	Asfalto Convencional	Asfalto Polímero	Asfalto Borracha
5,0	3800	6390	3979
5,5	4139	6858	3836
6,0	3846	6302	4946
6,5	3010	6614	4145

Tabela 4.16. Resultados do ensaio de módulo de resiliência para as misturas envelhecidas por 8 horas.

Teor %	Módulo de Resiliência (Mpa)		
	Temperatura de ensaio 25 °C		
	Período de envelhecimento 8 horas		
	Asfalto Convencional	Asfalto Polímero	Asfalto Borracha
5,0	4800	6870	4176
5,5	4577	7200	4691
6,0	4833	7253	5072
6,5	3987	7149	5824

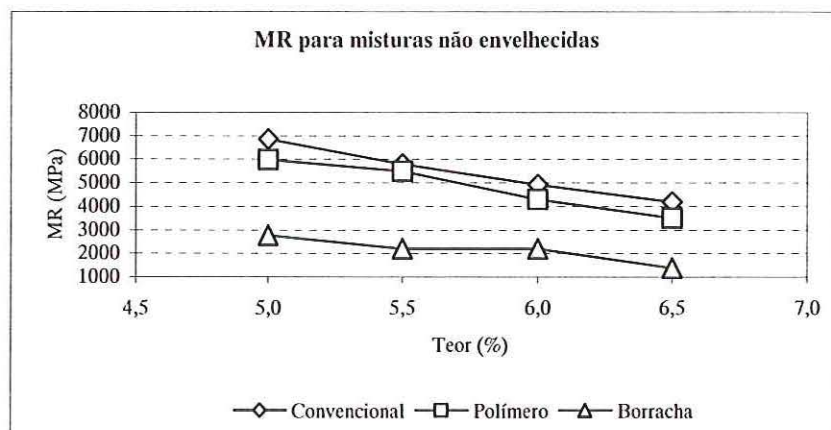


Figura 4.24 Módulo de resiliência para as misturas asfálticas submetidas ao envelhecimento a curto prazo por um período de 0 horas.

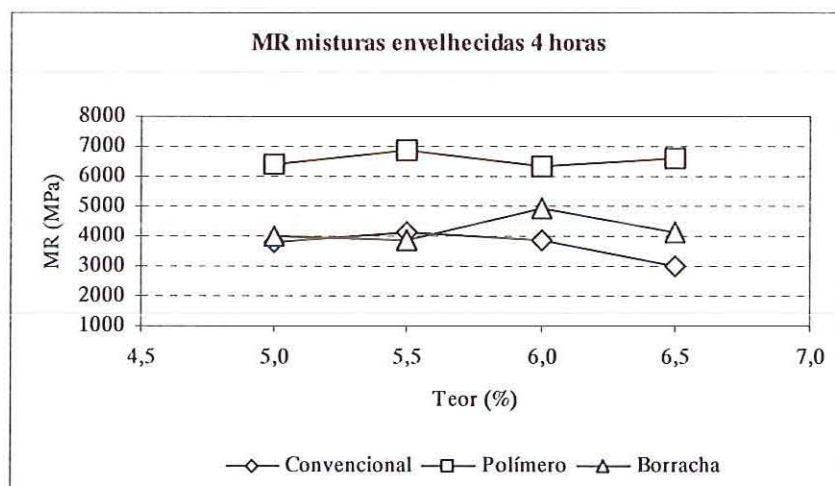


Figura 4.25. Módulo de resiliência para as misturas asfálticas submetidas ao envelhecimento a curto prazo por um período de 4 horas.

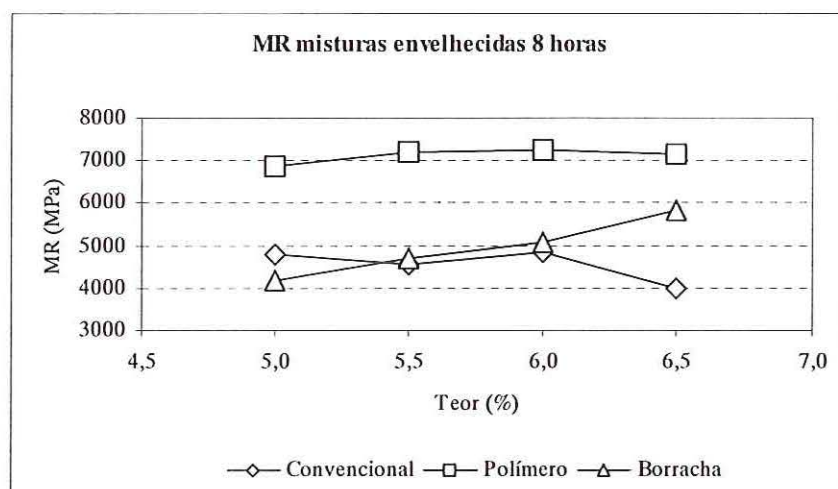


Figura 4.26. Módulo de resiliência para as misturas asfálticas submetidas ao envelhecimento a curto prazo por um período de 8 horas.

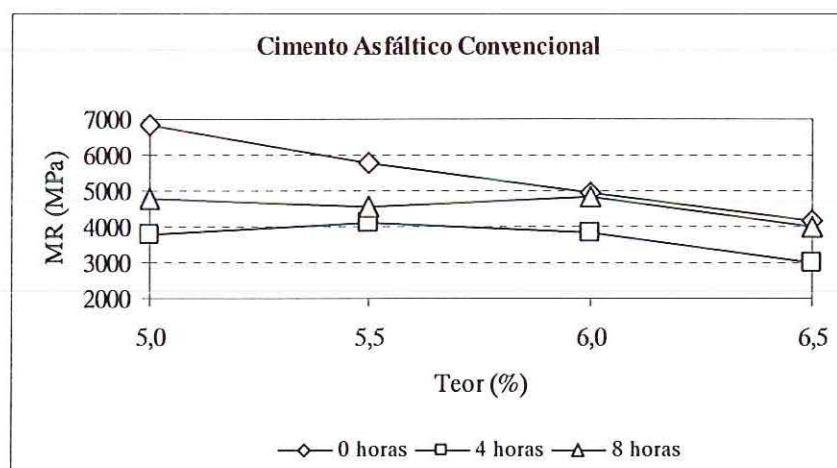


Figura 4.27. Módulo de resiliência para as misturas asfálticas moldadas com cimento asfáltico convencional submetidas ao envelhecimento a curto prazo.

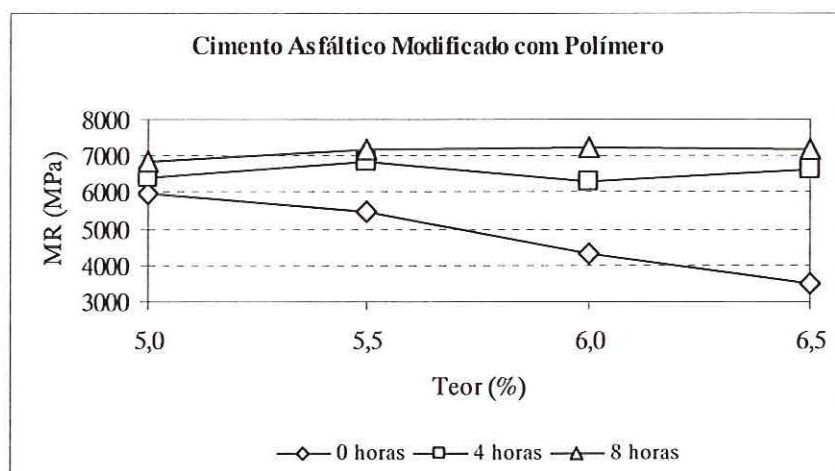


Figura 4.28. Módulo de resiliência para as misturas asfálticas moldadas com cimento asfáltico modificado com polímero submetidas ao envelhecimento a curto prazo.

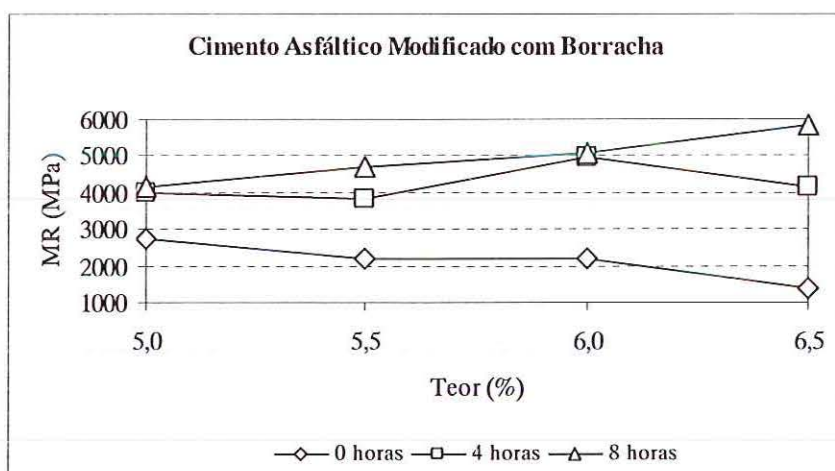


Figura 4.29. Módulo de resiliência para as misturas asfálticas moldadas com cimento asfáltico modificado com borracha submetidas ao envelhecimento a curto prazo.

De acordo com a figura 4.24, a mistura preparada com cimento asfáltico convencional apresenta os maiores valores para módulo de resiliência e a mistura preparada com cimento asfáltico modificada com borracha os menores valores. Nota-se também que os valores do módulo diminuí com o aumento do teor de asfalto.

As misturas asfálticas submetidas ao processo de envelhecimento a curto prazo por um período de 4 horas, figura 4.25, moldadas com cimento asfáltico modificado com polímero apresentam os maiores resultados para o ensaio de módulo de resiliência, as demais misturas asfálticas não apresentam diferenciação entre seus resultados, apenas para os teores 6,0% e 6,5% que as misturas preparadas com cimento asfáltico modificado com borracha apresentam um valor para módulo de resiliência pouco maior.

Para o processo de envelhecimento a curto prazo por um período de 8 horas, figura 4.26, as misturas preparadas com cimento asfáltico modificado com polímero apresentam a mesma tendência que no processo de envelhecimento a curto prazo por um período de 4 horas, apresentando resultados maiores com relação as demais misturas asfálticas. Uma tendência observada nesta figura é o crescente aumento do módulo de resiliência com o aumento do teor de asfalto para a mistura modificada com borracha.

As misturas asfálticas moldadas com cimento asfáltico convencional, figura 4.27, apresentaram os maiores resultados do ensaio de módulo de resiliência para o período de envelhecimento a curto prazo de 0 horas. As misturas asfálticas moldadas com cimento asfáltico modificado com polímero e cimento asfáltico modificado com borracha apresentaram os maiores resultados para o período de envelhecimento a curto prazo de 8 horas seguido do período de 4 horas.

Tabela 4.17. Resultados da análise de variância para módulo de resiliência para um nível de significância 5%.

Fonte de Variação	F_0	$F_{0,05}$ (tabela)	Influência
A	4,02	2,73	sim
B	32,00	3,12	sim
C	34,27	3,12	sim
AB	4,44	2,22	sim
AC	1,04	2,22	não
BC	7,42	2,50	sim

A – Teor de cimento asfáltico.

B – Período de envelhecimento a curto prazo.

C – Tipo de cimento asfáltico.

Tabela 4.18. Resultados da análise de variância para módulo de resiliência para um nível de significância 1%.

Fonte de Variação	F_0	$F_{0,01}$ (tabela)	Influência
A	4,02	4,06	não
B	32,00	4,90	sim
C	34,27	4,90	sim
AB	4,44	3,06	sim
AC	1,04	3,06	não
BC	7,42	3,58	sim

A – Teor de cimento asfáltico.

B – Período de envelhecimento a curto prazo.

C – Tipo de cimento asfáltico.

A tabela 4.17 apresenta os resultados de análise de variância do ensaio de módulo de resiliência para um nível de significância de 5%. De posse destes resultados observa-se que apenas a combinação entre os fatores “A” e “C” não influenciam nos resultados do ensaio de módulo de resiliência, com estes resultados concluímos que para este nível de significância todos os fatores influenciam nos resultados de módulo de resiliência e que os fatores “C” e “B” apresentam os maiores graus de influência: $F_0 = 34,27$ e $F_0 = 32,00$, respectivamente.

Para análise de variância com um nível de significância de 1%, tabela 4.18, apenas o fator “A” e a combinação entre os fatores “A” e “C” não influenciam significativamente nos resultados do ensaio de módulo de resiliência. Portanto, pode-se concluir que os fatores período de envelhecimento a curto prazo “B” e tipo de cimento asfáltico “C” influenciam nos resultados de módulo de resiliência, assim como, a combinação destes fatores e a combinação entre os fatores teor de cimento asfáltico “A” e período de envelhecimento “B”. Um panorama geral sobre a influência de cada um dos fatores é apresentado a seguir.

Tabela 4.19. Influência dos fatores nos resultados de ensaios.

Nível de siginificância 5%			
Fator \ Ensaio	Ensaio de Compressão Dinâmica		Ensaio de Resiliência
	Deformação total	Inclinação média	Módulo de Resiliência
Teor de asfalto	SIM	SIM	SIM
Envelhecimento		SIM	SIM
Tipo de ligante	SIM	SIM	SIM
Teor + envelhecimento	SIM	SIM	SIM
Teor + Tipo de ligante	SIM		
Envelhecimento + tipo		SIM	SIM

Nível de siginificância 1%			
Fator \ Ensaio	Ensaio de Compressão Dinâmica		Ensaio de Resiliência
	Deformação total	Inclinação média	Módulo de Resiliência
Teor de asfalto			
Envelhecimento		SIM	SIM
Tipo de ligante	SIM	SIM	SIM
Teor + envelhecimento	SIM		SIM
Teor + Tipo de ligante			
Envelhecimento + tipo		SIM	SIM

Uma apreciação mais quantitativa dos efeitos pode ser feita considerando-se os valores relativos das estatísticas F para cada situação, como mostram as figuras 4.30 a 4.35. O “Valor relativo de F” apresentado nos eixos das ordenadas é calculado segundo expressão 4.1. Ressalte-se que esse valor relativo serve apenas como indicação comparativa entre as significâncias dos efeitos.

$$\text{Valor Relativo de F} = \frac{(F_0 - F_{\text{crítico}})}{F_{\text{crítico}}}$$

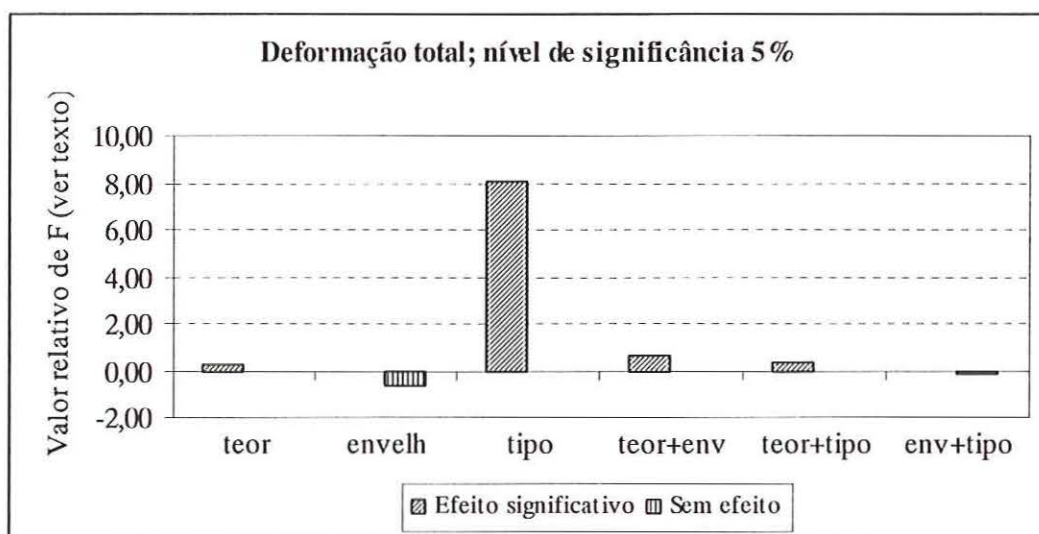


Figura 4.30. Efeito relativo dos fatores na deformação total do ensaio de fluência por compressão uniaxial dinâmica. Nível de significância 5%.

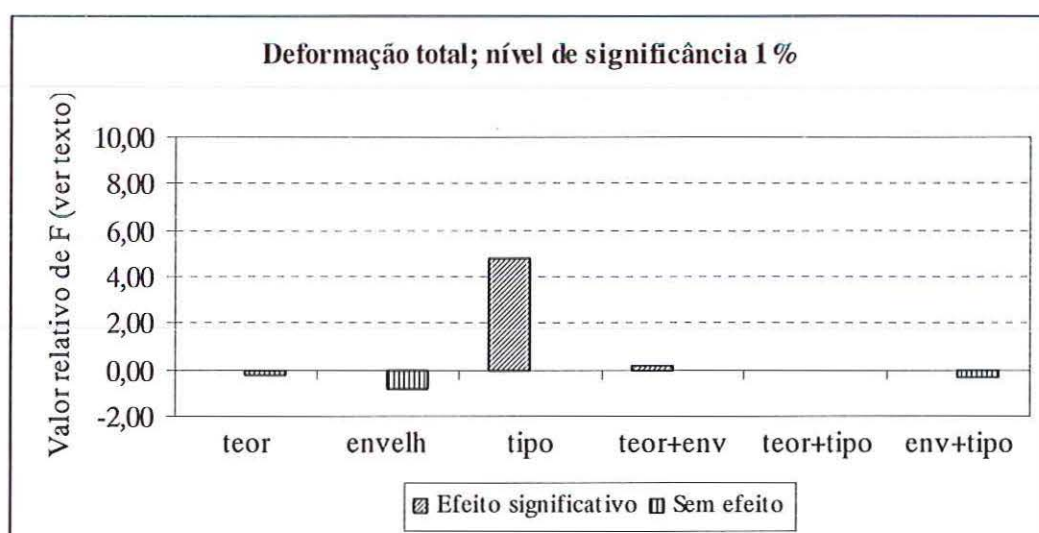


Figura 4.31. Efeito relativo dos fatores na deformação total do ensaio de fluência por compressão uniaxial dinâmica. Nível de significância 1%.

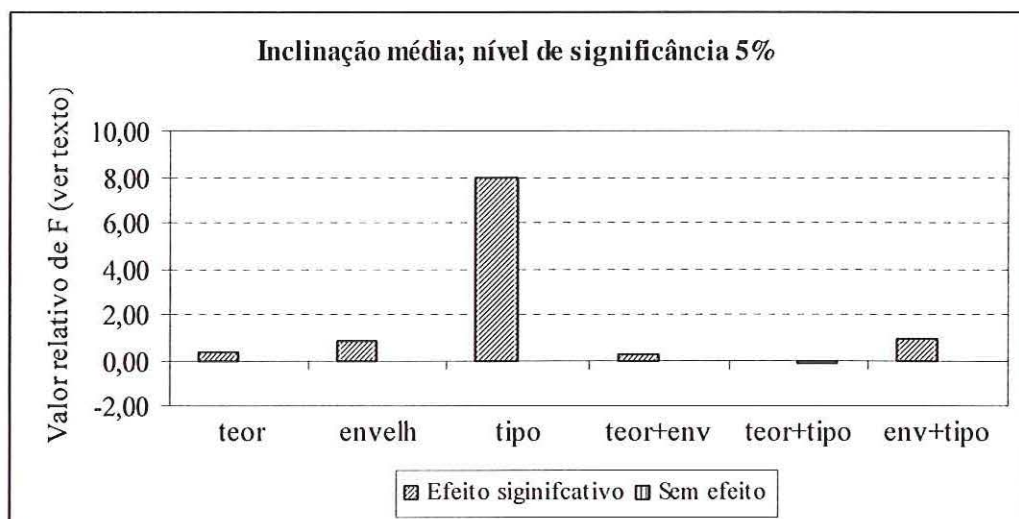


Figura 4.32. Efeito relativo dos fatores na inclinação média do ensaio de fluência por compressão uniaxial dinâmica. Nível de significância 5%.

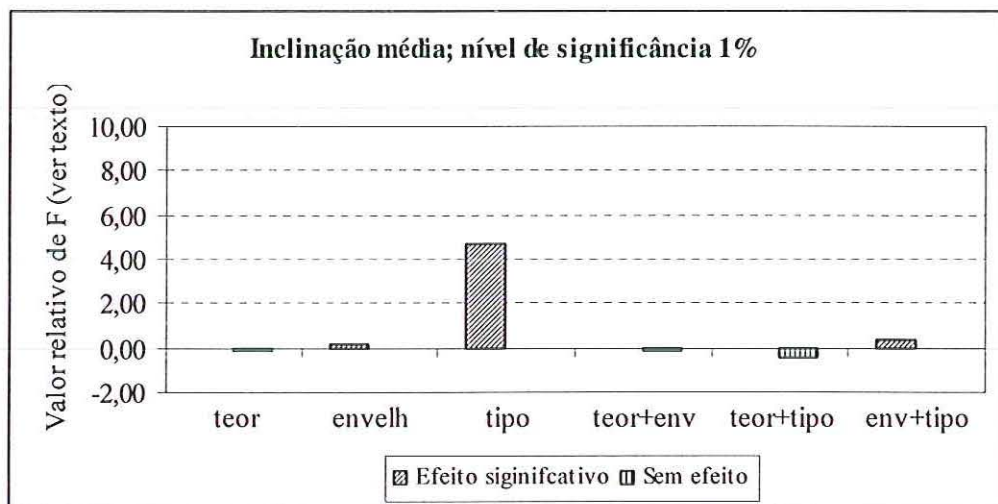


Figura 4.33. Efeito relativo dos fatores na inclinação média do ensaio de fluência por compressão uniaxial dinâmica. Nível de significância 1%.

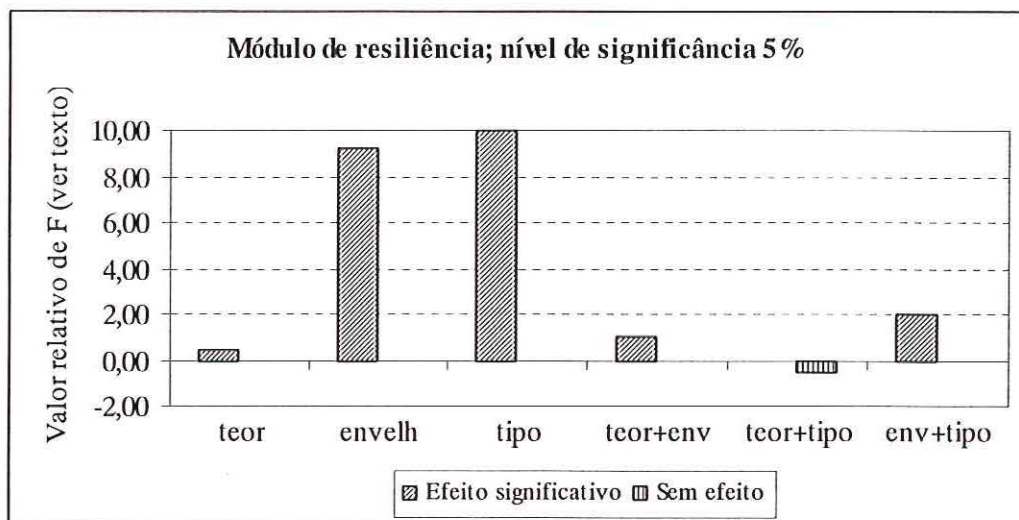


Figura 4.34. Efeito relativo dos fatores no módulo de resiliência do ensaio de tração por compressão diametral dinâmica. Nível de significância 5%.

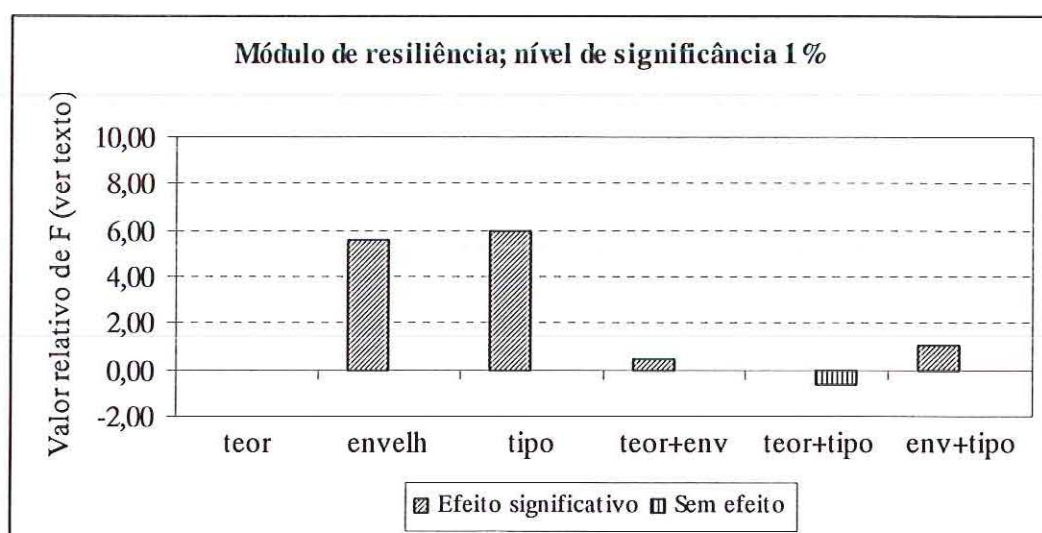


Figura 4.35. Efeito relativo dos fatores no módulo de resiliência do ensaio de tração por compressão diametral dinâmica. Nível de significância 1%.

CAPÍTULO 5: CONCLUSÕES

5.1. Introdução

Esta pesquisa teve por objetivo principal o estudo do comportamento mecânico de três misturas asfálticas submetidas ao processo de envelhecimento a curto prazo por um período de zero horas, quatro horas e oito horas. Neste capítulo serão apresentadas as conclusões obtidas da análise dos resultados apresentados anteriormente. Com base nos resultados dos ensaios realizados para os corpos-de-prova das três misturas asfálticas: dosagem Marshall, fluência por compressão uniaxial dinâmica, resistência à tração por compressão diametral e módulo de resiliência por compressão diametral dinâmica, faz-se uma comparação das misturas, a fim de verificar qual delas apresenta melhor desempenho.

5.2. Ensaio Marshall

De posse dos resultados do ensaio Marshall, apresentados no capítulo anterior, constata-se que os valores de densidade aparente e estabilidade foram menores para as misturas preparadas com cimento asfáltico modificado com borracha.

O volume de vazios e a relação betume-vazios apresentam valores praticamente idênticos para as três misturas.

Os valores de fluência foram maiores para as misturas preparadas com cimento asfáltico modificado com polímero.

5.3. Ensaio de Fluência por Compressão Uniaxial Dinâmica

As misturas asfálticas moldadas com cimento asfáltico modificado com polímero quando submetidas ao processo de envelhecimento a curto prazo por um período de 0 horas apresentaram os maiores resultados para deformação total nos teores 5,5%, 6,0% e 6,5%, no teor 5,0% o maior resultado para deformação total pertenceu às misturas preparadas com cimento asfáltico convencional.

De posse dos resultados dos ensaios de fluência para as misturas submetidas ao processo de envelhecimento a curto prazo por um período de 4 horas, constata-se que as misturas preparadas com cimento asfáltico convencional apresentaram os maiores resultados de deformação total para os teores 5,0%, 5,5% e 6,5%, no teor 6,0% as misturas moldadas com cimento asfáltico modificado com polímero apresentaram os maiores resultados de deformação total.

As misturas submetidas ao processo de envelhecimento a curto prazo por um período de 8 horas apresentaram os maiores resultados de deformação total para as misturas asfálticas moldadas com cimento asfáltico convencional e os menores resultados para as misturas asfálticas moldadas com cimento asfáltico modificado com borracha.

As misturas asfálticas moldadas com cimento asfáltico convencional apresentaram os maiores resultados de deformação total quando submetidas ao processo de envelhecimento a curto prazo por um período de 8 horas nos teores 5,5% e 6,0%, no teor de 5,0% para o período de 4 horas e no teor de 6,5% para o período de 0 horas.

As misturas asfálticas moldadas com cimento asfáltico modificado com polímero apresentaram os maiores resultados de deformação total nos teores de 5,0% e 6,0% quando submetidas ao processo de envelhecimento a curto prazo por um período de 4 horas, no teor de 5,5% para o período de 8 horas e no teor de 6,5% para o período de 0 horas.

As misturas asfálticas moldadas com cimento asfáltico modificado com borracha apresentaram os maiores resultados de deformação total quando submetidas ao

processo de envelhecimento a curto por um período de 0 horas, exceto para o teor 6,5% que apresentou o período de 4 horas com o maior resultado de deformação total.

As curvas de deformação total para as misturas submetidas ao processo de envelhecimento a curto prazo por um período de 8 horas apresentaram um ponto máximo para o teor 5,50%, teor ótimo adotado para as misturas em estudo.

As misturas asfálticas moldadas com cimento asfáltico convencional apresentaram maiores resultados de inclinação média quando submetidas ao processo de envelhecimento a curto prazo por um período de 4 horas (teores 5,0% e 6,5%) e 8 horas (teores 5,5% e 6,0%)

As misturas asfálticas moldadas com cimento asfáltico modificado com polímero apresentaram maiores resultados de inclinação média nos teores de 5,0% e 6,0% quando submetidas ao processo de envelhecimento por um período de 4 horas, no teor de 5,5% para o período de 8 horas e no teor de 6,5% para o período de 0 horas.

As misturas asfálticas moldadas com cimento asfáltico modificado com borracha apresentaram os maiores resultados de inclinação média quando submetidas ao processo de envelhecimento a curto prazo por um período de 4 horas, exceto para o teor 6,0% que apresentou o período de 0 horas com o maior resultado.

Os resultados de inclinação média não indicaram uma diferenciação de desempenho entre as misturas estudadas. As curvas apresentadas por esses resultados são semelhantes às curvas de deformação total apresentando melhor definição para as misturas submetidas ao processo de envelhecimento a curto prazo por um período de 8 horas.

5.4. Ensaio de Resistência à Tração por Compressão Diametral

As misturas asfálticas moldadas com cimento asfáltico convencional apresentaram os menores resultados do ensaio resistência à tração quando submetidas ao processo de

envelhecimento a curto prazo por um período de 0 horas, seguido do período de 4 horas e apresentando os maiores resultados para o período de 8 horas.

As misturas asfálticas moldadas com cimento asfáltico modificado com polímero apresentaram resultados do ensaio de resistência à tração semelhantes para todos os períodos de envelhecimento ocorrendo uma diferenciação no teor 6,0%, e 6,5%. Nesse último teor as misturas apresentaram a mesma seqüência crescente com o aumento do período de envelhecimento.

As misturas asfálticas moldadas com cimento asfáltico modificado com borracha apresentaram resultados do ensaio de resistência à tração idênticos em todos os teores de cimento asfáltico, diferenciando apenas no teor 6,5% apresentando a mesma seqüência da mistura anterior.

As misturas asfálticas moldadas com cimento asfáltico modificado com polímero apresentaram os maiores valores para o ensaio de resistência à tração para os três períodos de envelhecimento a curto prazo. As curvas encontradas pelos resultados do ensaio de resistência à tração para as misturas asfálticas submetidas ao processo de envelhecimento a curto prazo apresentam formas semelhantes, e um ponto de máximo para o teor 6,0% para as misturas preparadas com cimento asfáltico modificado com polímero nos períodos de envelhecimento a curto prazo de 4 e 8 horas.

5.5. Ensaio de Módulo de Resiliência por Compressão Diametral Dinâmica

As misturas asfálticas moldadas com cimento asfáltico convencional apresentaram os maiores resultados para ensaio de módulo de resiliência quando submetidas ao processo de envelhecimento a curto prazo por um período de 0 horas e os menores resultados para o período de 4 horas.

As misturas asfálticas moldadas com cimento asfáltico modificado com polímero e cimento asfáltico modificado com borracha apresentaram a mesma tendência para os resultados do ensaio de módulo de resiliência, aumentaram seus valores quando aumentou o período de envelhecimento a curto prazo.

Para as misturas asfálticas submetidas ao processo de envelhecimento a curto prazo por um período de 4 e 8 horas os maiores resultados dos ensaio de módulo de resiliência foram apresentados pelas misturas moldadas com cimento asfáltico modificado com polímero, já as demais misturas não apresentaram diferenças entre seus resultados.

Os resultados do ensaio de módulo de resiliência para as misturas submetidas ao processo de envelhecimento a curto prazo por um período de 4 e 8 horas apresentaram curvas praticamente constantes com o aumento do teor de cimento asfáltico. As misturas submetidas ao processo de envelhecimento a curto prazo por um período de 0 horas tendem a diminuir o valor de seu módulo de resiliência com o aumento do teor de cimento asfáltico.

5.6. Conclusão Geral

De acordo com o ensaio de dosagem Marshall, as misturas preparadas com cimento asfáltico modificado com polímero apresentaram um melhor desempenho com relação a estabilidade; quanto a fluência, as misturas preparadas com cimento asfáltico convencional apresentaram melhor desempenho.

Conforme resultados ensaio de fluência por compressão uniaxial dinâmica e tratamento estatístico, as misturas preparadas com cimentos asfálticos modificados, de uma maneira geral, apresentam melhor desempenho quando submetidos ao processo de envelhecimento a curto prazo.

Através dos resultados do ensaio de fluência uniaxial dinâmica tem-se um indicativo da influência do processo de envelhecimento a curto prazo no desempenho das misturas asfálticas estudadas.

As misturas asfálticas moldadas com cimento asfáltico modificado com polímero e cimento asfáltico modificado com borracha apresentaram resultados semelhantes para o ensaio de resistência à tração, ocorrendo uma variação em seus resultados conforme o aumento do período de envelhecimento a curto prazo, apenas no último teor de cimento asfáltico estudado neste trabalho, portanto, o ensaio de resistência à

tração, para as misturas modificadas, sofreu pouco influência em seus resultados quando submetidos ao processo de envelhecimento a curto prazo.

De acordo com os resultados do ensaio de módulo de resiliência verifica-se que as misturas moldadas com cimento asfáltico modificado com borracha e as misturas moldadas com cimento asfáltico modificados com polímero, apresentam os maiores resultados para o ensaio de módulo de resiliência quando submetidas ao processo de envelhecimento a curto prazo. Portanto, o processo de envelhecimento a curto prazo tem influência nos resultados do ensaio de módulo de resiliência, ou seja, aumento o período de envelhecimento a curto prazo aumenta o valor do módulo de resiliência.

5.7. Sugestões para Pesquisas Posteriores

Estudar o processo de envelhecimento a curto e longo prazo de outros tipos de cimentos asfálticos;

Estudar o processo de envelhecimento do ligante asfáltico convencional e modificado segundo as especificações SUPERPAVE;

Estudar os teores e tipos de modificadores do cimento asfáltico;

Realizar outros ensaios com CBUQ empregando cimentos asfálticos modificados e submetidos ao processo de envelhecimento a curto e longo prazo, como fadiga;

Simular os processos de envelhecimento de um pavimento asfáltico em campo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AASHTO – American Association State Highway Transportation Officials (2001). Standard practice for mixture conditioning of hot mix asphalt (HMA). Edição publicada sob a designação PP2-00, 3p.
- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1993). NBR 12891. Dosagem de misturas betuminosas pelo método Marshall. Rio de Janeiro.
- BAHIA, H. U. (1995). Critical evaluation of asphalt modification using strategic highway research program concepts. Transportation Research Record, Transportation Research Board, n. 1488, National Research Council, Washington, DC, p.
- BELL, C. A.; ABWAHAB, Y.; CRISTI, M. E. (1991). Investigation of laboratory aging procedures for asphalt-aggregate mixtures. Transportation Research Record, Transportation Research Board, n. 1323, National Research Council, Washington, DC, p. 32-46.
- BRÛLÉ, B. (1996). Polymer-modified asphalt cements used in the road construction industry: Basic principles. Transportation Research Record, Transportation Research Board, n. 1535, National Research Council, Washington, DC, p. 48-53.

CAMPOS, B. A. L.; VIEIRA, R. T.; JUNIOR, S. D. SOUSA, J. M. B.; GONTIJO, P. R. A. (2000). Asfalto-borracha – uma novidade com 40 anos de existência!. In: 32º REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO. Brasília, Anais, Associação Brasileira de Pavimentação – ABPv, p. 211-221.

CERATTI, J. A.; RUWER, P. M.; OLIVEIRA, J.A. (1996). Estudo do comportamento mecânico de concreto asfáltico com ligante modificado com polímero. In: 13º ENCONTRO DO ASFALTO, Anais, Instituto Brasileiro do Petróleo – IBP, p. 290-303.

CHOUBANE, B.; SHOLAR, G. A.; MUSSELMAN, J. A.; PAGE, G. C. (1999). Tem-year performance evaluation of asphalt-rubber surface mixes. Transportation Research Record, Transportation Research Board, n. 1681, National Research Council, Washington, DC, p. 10-18.

CORTÉ, J. F.; BROSSEAUD, Y.; SIMONCELLI, J. P.; CAROFF, G. (1994). Investigation of rutting of asphalt surface layers: Influence of binder and axle loading configuration. Transportation Research Record, Transportation Research Board, n. 1436, National Research Council, Washington, DC, p. 28-37.

DER – DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM DO ESTADO DE SÃO PAULO (1960). M 148-60. Dosagem de misturas betuminosas pelo método da superfície específica. São Paulo.

DNER – DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM (1994). DNER-ME 138/94. Misturas betuminosas – determinação da resistência à tração por compressão diametral. Rio de Janeiro.

DNER – DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM (1994). DNER-ME 133/94. Misturas betuminosas – determinação do módulo de resiliência. Rio de Janeiro.

DNER – DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM
(1997). DNER-ES 313/97. Pavimentação – concreto betuminoso. Rio de Janeiro.

DNER – DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM
(1999). DNER-ES 385/99. Pavimentação – concreto asfáltico com asfalto polímero. Rio de Janeiro.

EL HUSSEIN, H. M.; YUE, Z. (1994). Criteria for evaluation of rutting potential based on repetitive uniaxial compression test. Transportation Research Record, Transportation Research Board, n. 1454, National Research Council, Washington, DC, p. 74-81.

ESTAKHRI, C. K.; BUTTON, J. W.; FERNANDO, E. G. (1992). Use, availability, and cost-effectiveness of asphalt rubber in Texas. Transportation Research Record, Transportation Research Board, n. 1339, National Research Council, Washington, DC, p. 30-37.

FREITAS, F. J. S. (1996). Asfalto modificado com EVA. In: 30º REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, Salvador, Anais, Associação Brasileira de Pavimentação – ABPV, p. 61-74.

HANSON, D. I.; FOO, K. Y.; BROWN, E. R.; DENSON, R. (1994). Evaluation and characterization of a rubber-modified hot mix asphalt pavement. Transportation Research Record, Transportation Research Board, n. 1436, National Research Council, Washington, DC, p. 98-107.

HEITZMAN, M. (1992). Design and construction of asphalt paving materials with crumb rubber modifier. Transportation Research Record, Transportation Research Board, n. 1339, National Research Council, Washington, DC, p. 1-8.

- HILLS, J. F. (1973). The creep of asphalt mixes. *Journal of the Institute of Petroleum*, v.59, n.570, p. 247-262.
- IBP – Instituto Brasileiro de Petróleo (1996). Informativo “O Asfalto”, Rio de Janeiro, p. 1-6.
- ISACSSON, U. & LU, X. (1995). Testing and appraisal of polymer modified road bitumens – state of art. *Materials and Structures*, v. 28, p. 139-159.
- KANDHAL, P. S.; CHAKRABORTY, S. (1996). Effect of asphalt film thickness on short- and long-term aging of asphalt paving mixtures. *Transportation Research Record*, Transportation Research Board, n. 1535, National Research Council, Washington, DC, p.83-90.
- LEITE, L. F. M. (1999). Estudos de preparo e caracterização de asfaltos modificados por polímero. Rio de Janeiro. 266 p. Tese (Doutorado) – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- LEITE, L. F. M.; CONSTANTINO, R. S.; DUNLOP, M. S.; FIGUEIREDO, M. A. G. (1995). Asfalto modificado por polímero-ligante resistente à formação de trincas e deformação permanente. In: 29º REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, Cuiabá, Anais, Associação Brasileira de Pavimentação – ABPv, p. 179-206.
- LING, M.; CURTIS, C. W.; HANSON, D. I.; HOOL, J. N. (1997). Quantitative analysis of polymers and crumb rubber in hot-mix asphalts. *Transportation Research Record*, Transportation Research Board, n. 1586, National Research Council, Washington, DC, p. 57-67.
- LU, X.; ISACSSON, U. (1997). Rheological characterization of styrene-butadiene-styrene copolymer modified bitumens. *Construction and Building Materials*, v. 11, n. 1, 9.23-32.

- LU, X.; ISACSSON, U. (1999). Chemical and rheological characteristics of styrene-butadiene-styrene polymer-modified bitumens. Transportation Research Record, Transportation Research Board, n. 1661, National Research Council, Washington, DC, p. 83-92.
- MAUPIN, G. W. (1972). Results of indirect tensile tests related to asphalt fatigue. Highway Research Record, Highway Research Board, n. 404, National Research Council, Washington, DC, p. 1-7.
- MARTIN, K. L.; DAVISON, R. R.; GLOVER, C. J.; BULLIN, J. A. (1990). Asphalt aging in Texas roads and test sections. Transportation Research Record, Transportation Research Board, n. 1269, National Research Council, Washington, DC, p. 9-19.
- MARTINHO, F. G.; MONTENEGRO, F. G.; TRAJANO, L. (1994). Coperflex asphalt – uma combinação asfalto e elastômero. In: 12º ENCONTRO DE ASFALTO, Anais, Instituto Brasileiro de Petróleo, v. 2, p. 281-291.
- MOTTA, L. M. G.; SÁ, M. F. P.; OLIVEIRA, P. M. F.; SOUSA, A. M. (1996). O ensaio de creep estático e dinâmico na avaliação das misturas betuminosas. In: 30º REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, Salvador, Anais, Associação Brasileira de Pavimentação – ABPv, p. 115-135.
- ODA, S. (2000). Análise da viabilidade técnica da utilização do ligante asfalto-borracha em obras de pavimentação. São Carlos. 251 p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- PETERSEN, J. C. (1990). Effects of physicochemical factors on asphalt aging. Serviceability and Durability of Construction Materials. V. 1, p. 244-253.
- PETERSEN, J. C.; BRANTHAVER, J. F.; ROBERTSON, R. E.; HARNSBERGER, P.M.; DUVALL, J. J.; ENSLEY, E. K. (1993). Effects of physicochemical

factors on asphalt oxidations kinetics. Transportation Research Record, Transportation Research Board, n. 1391, National Research Council, Washington, D.C., p. 1-10.

PINTO, S.; PREUSSLER, E. S. (1980). Módulos resilientes de concretos asfálticos. In: 5º ENCONTRO DE ASFALTO, Rio de Janeiro, Anais, Instituto Brasileiro do Petróleo – IBP.

QUEIROZ, C. A. V.; VISSER, A. T. (1984). Uma investigação dos módulos de resiliência de revestimentos betuminosos brasileiros. In: 14º REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, João Pessoa, Anais, Associação Brasileira de Pavimentação – ABPv, p. 353-387.

RAMOS, C. R.; LÁO, V. L. E. S. T.; MARTINHO, F. G.; MACEDO, M. M. D. (1996). Asfalto modificado com polímero – uma opção para melhoria dos asfaltos nacionais. In 13º ENCONTRO DE ASFALTO, Anais do Instituto Brasileiro de Petróleo – IBP, v. 1, p. 60-82.

SCHMIDT, R. J. (1972). A practical method for measuring the resilient modulus of asphalt-treated mixes. Highway Research Record, Highway Research Board, n. 404, National Research Council, Washington, DC, p. 22-32.

SHULER, T. S.; HANSON, D. I.; MCKEEN, R. G. (1992). Design and construction of asphalt concrete using polymer modified asphalt binders. Polymer Modified Asphalt Binders, American Society for Testing and Materials, ASTM STP 1108, p. 97-127.

TAYEBALI, A. A.; GOODRICH, J. L.; SOUSA, J. B.; MONISMITH, C. L. (1992). Influence of the rheological properties of modified asphalt binders on the load deformation characteristics of the binder-aggregate mixtures. Polymer Modified Asphalt Binders, American Society for Testing and Materials, ASTM STP 1108, p. 77-96.

- ULMGREN, N. (1996). Functional testing of asphalt mixes for permanent deformation by dynamic creep test modification of method and round robin test. EAPA, Eurobitume Congress, Strasbourg 7-10 May 1996.
- VALKERING, C. P.; LANCON, D. J. L.; HILSTER, E.; STOKER, D. A. (1990). Rutting resistance of asphalt mixes containing non-conventional and polymer-modified binders. Symposium – Improved Rut Resistance, Association of Asphalt Paving Technologists – AAPT, Proceedings, p. 590-609.
- WHITEOAK, D. (1991). The Shell Bitumen Handbook. Shell Bitume UK, United Kingdom, 1. ed., 336p.
- ZANZOTTO, L.; KENNEPOHL, G. J. (1996). Development of rubber and asphalt binders by depolymerization and devulcanization of scrap tires in asphalt. Transportation Research Record, Transportation Research Board, n. 1530, National Research Council, Washington, DC, p. 51-58.

BIBLIOGRAFIA CONSULTADA

ABWAHAB, Y.; SOSNOVSKE, D.; BELL, C. A.; RYUS, P. (1993). Evaluation of Asphalt-Aggregate mixture aging by dynamic mechanical analysis. Transportation Research Record, Transportation Research Board, n. 1386, National Research Council, Washington DC, p22-30.

AMARAL, S. C. (2000). Estudos de misturas asfálticas densas com agregados do estado do Pará, utilizando asfalto convencional (CAP-40) e asfalto modificado com polímero SBS (Betuflex B 65/60). São Carlos. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

BAHIA, H. U.; ANDERSON, D. A. (1995). Strategic highway research program binder rheological parameters: Background and comparison with conventional properties. Transportation Research Record, Transportation Research Board, n. 1488, National Research Council, Washington, DC, p. 32-39.

BARTH, E. J. (1962). Asphalt scienc and technology. Scienc Publishers, Inc. New York, N.Y.

BOUDREAU, R. L.; HICKS, R. G.; FURBER, A. M. (1992). Effects of test parameters on resilient modulus of laboratory-compacted asphalt concrete specimens. Transportation Research Record, Transportation Research Board, n. 1353, National Research Council, Washington, DC, p.46-52.

- COELHO, V. (1996). Contribuição ao estudo das deformações permanentes, nas condições do Brasil, em camadas de concreto asfáltico de pavimentação. São Carlos. 281p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- ELLIOTT, R. P.; THORNTON, S. I. (1988). Resilient modulus and AASHTO pavement design. Transportation Research Record, Transportation Research Board, n. 1196, National Research Council, Washington, DC, p.116-124.
- FAXINA, A. L. (2002). Estudo em laboratório do desempenho de concreto asfáltico usinado a quente empregando ligante tipo asfalto-borracha. São Carlos. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- FLECKENSTEIN, L. J.; MAHBOUD, K.; ALLEN, D. L. (1992). Performance of polymer modified asphalt mixes in Kentucky. Polymer Modified Asphalt Binders, American Society for Testing and Materials, ASTM STP 1108, p.173-185.
- FORETTI, A. C. (1999). Estudo de misturas preparadas com asfalto convencional e asfalto modificado com polímeros. São Carlos, 147 p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- GARRICK, N. W.; BISKUR, R. R. (1990). Effects of asphalt properties on indirect tensile strength. Transportation Research Record, Transportation Research Board, n. 1269, National Research Council, Washington, DC, p. 26-39.
- HUANG, S.; BRANTHAVER, J. F.; ROBERTSON, R. E.; KIM, S. (1998). Effect of film thickness on the rheological properties of asphalts in contact with aggregate surface. Transportation Research Record, Transportation Research Board, n. 1638, National Research Council, Washington, DC, p. 31-39.

- HUH, J.; ROBERTSON, R. E. (1996). Modeling of oxidative aging behavior of asphalts from short-term, high-temperature data as a step toward prediction of pavement aging. Transportation Research Record, Transportation Research Board, n. 1535, Nacional Research Council, Washington DC, p91-97.
- JEMISON, H. B.; DAVIDSON, R. R.; GLOVER, C. J.; BULLIN, J. A. (1991). Evaluation of standard oven tests for hot-mix plant aging. Transportation Research Record, Transportation Research Board, n. 1323, Nacional Research Council, Washington DC, p77-84.
- LITTLE, D. N.; BUTTON, J. W.; YOUSSEF, H. (1993). Development of criteria to evaluate uniaxial creep data and asphalt concrete permanent deformation potential. Transportation Research Record, Transportation Research Board, n. 1417, National Research Council, Washington, DC, p. 49-57.
- MAUPIN, G. W. (1972). Results of indirect tensile tests related to asphalt fatigue. Highway Research Record, Highway Research Board, n. 404, Nacional Research Council, Washington DC, p1-7.
- PINTO, S. (1991). Estudo do comportamento à fadiga de misturas betuminosas e aplicação na avaliação estrutural de pavimentos. Rio de Janeiro. 478p. Tese (Doutorado). COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- SÁ, M. F. P.; MOTTA, L. M. G. (1996). Utilização de ensaios de creep estático e dinâmico para caracterização de misturas asfálticas. In: 13º ENCONTRO DE ASFALTO. Anais do Instituto Brasileiro de Petróleo – IBP.
- SIDDIQUI, Z.; TRETHERWEY, M. W.; ANDERSON, D. A. (1988). Variables affecting Marshall test results. Transportation Research Record, Transportation Research Board, n. 1171, Nacional Research Council, Washington DC, p139-148.

SOSNOVSKE, D. A.; ABWAHAB, Y.; BELL, C. A. (1993). Role of asphalt and aggregate in the aging of bituminous mixtures. Transportation Research Record, Transportation Research Board, n. 1386, National Research Council, Washington DC, p10-21.

TAIRA, C (2001). Avaliação do desempenho em laboratório de misturas asfálticas densas utilizando asfalto convencional (CAP-20) e asfalto modificado com polímero SBS (Betuflex B 65/60). São Carlos. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

TONIAL, I. A. (2001). Influência do envelhecimento do revestimento asfáltico na vida de fadiga de pavimentos. Rio de Janeiro. 151p. Dissertação (Mestrado). COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro.

ZHAI, H.; BAHIA, H. U.; ERICKSON, S. (2000). Effect of film thickness on rheological behavior of Asphalt Binders. Transportation Research Record, Transportation Research Board, n. 1728, National Research Council, Washington, DC, p. 7-14.

ANEXOS

Páginas 95 a 131.

Anexo A – Resultados do ensaio de dosagem Marshall.

Anexo B – Resultados do ensaio de fluência por compressão uniaxial dinâmica.

Anexo C – Resultados do ensaio de resistência à tração por compressão diametral.

Anexo D – Resultados do ensaio de módulo de resiliência por compressão diametral dinâmica.

Tabela A1. Resultados do ensaio de dosagem Marshall para as misturas moldadas com cimento asfáltico convencional.

Ensaio Marshall para Mistura com Cimento Asfáltico Modificado com Polímero SBS

CP no.	Porc. CAP	Porc. Agreg.	Massa ao ar	M. ar Parf.	M. Im. c/ Par.	Massa Paraf.	Volume Parf.	Volume Total	Vol. CP	Dens. Ap.	Carga	Corr.	Est. N	Densid. Teórica	Fluê. mm	Vb %	Vv %	RBV %
01cp	4,5	95,5	1223,03	1235,88	730,90	12,85	13,97	504,98	491,0	2,491	31,90	1,09	15520	2,656	3,3	10,95	6,23	63,73
02cp	4,5	95,5	1247,41	1254,78	745,95	7,37	8,01	508,83	500,8	2,491	32,20	1,04	14948	2,656	3,56	10,95	6,23	63,72
03cp	4,5	95,5	1238,74	1250,02	738,90	11,28	12,26	511,12	498,9	2,483	30,70	1,04	14251	2,656	3,81	10,91	6,52	62,61
04cp	5,0	95,0	1240,72	1260,30	742,10	19,58	21,28	518,20	496,9	2,497	32,20	1,04	14948	2,634	3,81	12,19	5,22	70,03
05cp	5,0	95,0	1237,23	1256,09	740,30	18,86	20,50	515,79	495,3	2,498	37,80	1,09	18391	2,634	3,56	12,20	5,17	70,21
06cp	5,0	95,0	1234,77	1259,07	738,70	24,30	26,41	520,37	494,0	2,500	39,30	1,09	19121	2,634	3,81	12,21	5,11	70,50
07cp	5,5	94,5	1237,49	1264,23	743,90	26,74	29,07	520,33	491,3	2,519	45,00	1,09	21894	2,613	4,06	13,53	3,59	79,05
08cp	5,5	94,5	1234,39	1257,01	739,90	22,62	24,59	517,11	492,5	2,506	44,70	1,09	21748	2,613	3,81	13,46	4,07	76,77
09cp	5,5	94,5	1241,16	1262,47	744,00	21,31	23,16	518,47	495,3	2,506	43,00	1,09	20921	2,613	4,06	13,46	4,09	76,70
10cp	6,0	94,0	1237,76	1256,41	741,20	18,65	20,27	515,21	494,9	2,501	41,60	1,09	20240	2,591	3,81	14,65	3,49	80,74
11cp	6,0	94,0	1242,82	1269,60	744,80	26,78	29,11	524,80	495,7	2,507	41,40	1,04	19218	2,591	4,57	14,69	3,25	81,90
12cp	6,0	94,0	1240,97	1263,07	744,00	22,10	24,02	519,07	495,0	2,507	41,60	1,09	20240	2,591	4,32	14,69	3,27	81,81
13cp	6,5	93,5	1235,91	1265,14	738,10	29,23	31,77	527,04	495,3	2,495	31,80	1,09	15472	2,570	5,08	15,84	2,92	84,44
14cp	6,5	93,5	1226,70	1255,68	732,90	28,98	31,50	522,78	491,3	2,497	32,40	1,09	15763	2,570	5,08	15,85	2,86	84,71
15cp	6,5	93,5	1236,72	1264,12	740,40	27,40	29,78	523,72	493,9	2,504	36,00	1,09	17515	2,570	5,08	15,89	2,59	85,97

Tabela A2. Resultados do ensaio de dosagem Marshall para as misturas moldadas com cimento asfáltico modificado com polímero.

Ensaio Marshall para Misturas com Cimento Asfáltico Modificado com Borracha Reciclada de Pneu

CP no.	Porc. CAP	Porc. Agreg.	Massa ao ar	M. ar Parf.	M. Im. c/ Par.	Massa Paraf.	Volume Parf.	Volume Total	Vol. CP	Dens. Ap.	Carga	Corr.	Est. N	Densid. Teórica	Fluê. mm	Vb	Vv	RBV
01cb	4,5	95,5	1231,02	1237,34	732,50	6,32	6,87	504,84	498,0	2,472	22,80	1,04	10584	2,656	3,05	10,88	6,91	61,16
02cb	4,5	95,5	1220,17	1229,06	724,00	8,89	9,66	505,06	495,4	2,463	25,60	1,09	12455	2,656	3,05	10,84	7,25	59,92
03cb	4,5	95,5	1229,82	1236,68	733,00	6,86	7,46	503,68	496,2	2,478	23,50	1,04	10909	2,656	3,56	10,91	6,68	62,04
04cb	5,0	95,0	1229,06	1240,34	736,50	11,28	12,26	503,84	491,6	2,500	29,60	1,09	14401	2,634	3,56	12,23	5,07	70,72
05cb	5,0	95,0	1223,20	1234,96	732,50	11,76	12,78	502,46	489,7	2,498	30,30	1,09	14742	2,634	3,30	12,22	5,15	70,35
06cb	5,0	95,0	1225,38	1242,13	732,00	16,75	18,21	510,13	491,9	2,491	28,10	1,09	13671	2,634	3,56	12,19	5,42	69,23
07cb	5,5	94,5	1234,47	1249,20	741,00	14,73	16,01	508,20	492,2	2,508	31,10	1,09	15131	2,612	3,81	13,50	3,98	77,25
08cb	5,5	94,5	1230,25	1245,13	738,00	14,88	16,17	507,13	491,0	2,506	30,80	1,09	14985	2,612	3,81	13,49	4,06	76,85
09cb	5,5	94,5	1238,10	1253,30	742,50	15,20	16,52	510,80	494,3	2,505	32,00	1,09	15569	2,612	4,06	13,48	4,10	76,68
10cb	6,0	94,0	1238,01	1248,25	740,50	10,24	11,13	507,75	496,6	2,493	25,60	1,04	11884	2,591	4,32	14,64	3,77	79,50
11cb	6,0	94,0	1243,59	1255,06	743,50	11,47	12,47	511,56	499,1	2,492	26,30	1,04	12209	2,591	4,32	14,63	3,82	79,30
12cb	6,0	94,0	1240,65	1252,10	741,00	11,45	12,45	511,10	498,7	2,488	24,10	1,04	11187	2,591	4,32	14,61	3,96	78,66
13cb	6,5	93,5	1239,59	1252,70	738,00	13,11	14,25	514,70	500,5	2,477	19,70	1,04	9145	2,570	4,57	15,75	3,61	81,37
14cb	6,5	93,5	1238,23	1251,58	737,50	13,35	14,51	514,08	499,6	2,479	19,20	1,04	8913	2,570	4,57	15,76	3,54	81,65
15cb	6,5	93,5	1244,13	1255,45	738,50	11,32	12,30	516,95	504,6	2,465	19,50	1,04	9052	2,570	4,57	15,68	4,06	79,44

Tabela A3. Resultados do ensaio de dosagem Marshall para as misturas moldadas com cimento asfáltico modificado com polímero.

Ensaio de Marshall para Mistura com Cimento Asfáltico Convencional

CP no.	Porc. CAP	Porc. Agreg.	Massa ao ar	M. ar Parf.	M. Im. c/ Par.	Massa Paraf.	Volume Parf.	Volume Total	Vol. CP	Dens. Ap.	Carga	Corr.	Est. N	Densid. Teórica	Fluê. mm	Vb %	Vv %	RBV %
01c	4,5	95,5	1228,93	1257,57	733,20	28,64	31,13	524,37	493,2	2,492	36,50	1,06	17269	2,656	3,05	10,95	6,20	63,84
02c	4,5	95,5	1227,26	1262,18	732,20	34,92	37,96	529,98	492,0	2,494	33,00	1,05	15466	2,656	3,05	10,96	6,10	64,26
03c	4,5	95,5	1224,93	1254,08	729,30	29,15	31,68	524,78	493,1	2,484	34,40	1,07	16429	2,656	3,05	10,92	6,48	62,75
04c	5,0	95,0	1235,30	1260,14	739,90	24,84	27,00	520,24	493,2	2,504	37,80	1,05	17716	2,634	3,30	12,23	4,93	71,27
05c	5,0	95,0	1245,83	1267,68	741,80	21,85	23,75	525,88	502,1	2,481	39,20	1,05	18372	2,634	3,30	12,11	5,82	67,56
06c	5,0	95,0	1234,32	1265,30	738,80	30,98	33,67	526,50	492,8	2,505	38,20	1,05	17903	2,634	3,05	12,23	4,92	71,29
07c	5,5	94,5	1236,85	1273,33	741,00	36,48	39,65	532,33	492,7	2,510	41,20	1,05	19309	2,613	3,56	13,48	3,91	77,51
08c	5,5	94,5	1237,52	1269,03	741,70	31,51	34,25	527,33	493,1	2,510	45,00	1,05	21090	2,613	3,56	13,48	3,94	77,39
09c	5,5	94,5	1237,00	1270,60	740,40	33,60	36,52	530,20	493,7	2,506	42,80	1,05	20059	2,613	3,81	13,46	4,10	76,67
10c	6,0	94,0	1242,31	1273,91	743,00	31,60	34,35	530,91	496,6	2,502	31,50	1,06	14904	2,591	3,81	14,66	3,46	80,92
11c	6,0	94,0	1234,44	1272,21	737,00	37,77	41,05	535,21	494,2	2,498	31,70	1,05	14857	2,591	3,81	14,64	3,60	80,25
12c	6,0	94,0	1244,97	1282,97	743,20	38,00	41,30	539,77	498,5	2,498	32,70	1,06	15472	2,591	4,06	14,63	3,62	80,17
13c	6,5	93,5	1243,48	1273,09	741,60	29,61	32,18	531,49	499,3	2,490	28,00	1,07	13373	2,570	4,06	15,81	3,11	83,54
14c	6,5	93,5	1237,29	1278,51	737,60	41,22	44,80	540,91	496,1	2,494	26,60	1,05	12467	2,570	4,32	15,83	2,97	84,18
15cc	6,5	93,5	1248,70	1285,13	744,50	36,43	39,60	540,63	501,0	2,492	29,30	1,05	13732	2,570	4,32	15,82	3,04	83,87

Tabela B1. Resultados de deformação total do ensaio de fluência por compressão uniaxial dinâmica das misturas moldadas com cimento asfáltico convencional envelhecidas por um período de 0 horas.

Corpo de prova	convc2a10	convc2a11	convc2a12
Mistura	Cimento Asfáltico Convencional		
Período envelhecimento	0 horas		
Altura média (mm)	59,4	58,7	60,2
Leitura inicial (mm)	0,0136	0,0399	0,0285
Leitura 100s (mm)	0,1661	0,2105	0,0760
Leitura final (mm)	0,2707	0,3302	0,2372
Deformação Total (%)	0,433	0,494	0,347
Inclinação	2,14E-05	2,44E-05	3,29E-05
Corpo de prova	convc3a10	convc3a11	convc3a12
Mistura	Cimento Asfáltico Convencional		
Período envelhecimento	0 horas		
Altura média (mm)	58,4	58,7	58,0
Leitura inicial (mm)	-0,2666	-0,2589	-0,2720
Leitura 100s (mm)	-0,2420	-0,2361	-0,2477
Leitura final (mm)	-0,2046	-0,1813	-0,1967
Deformação Total (%)	0,106	0,132	0,130
Inclinação	7,65E-06	1,12E-05	1,04E-05
Corpo de prova	convc4a10	convc4a11	convc4a12
Mistura	Cimento Asfáltico Convencional		
Período envelhecimento	0 horas		
Altura média (mm)	58,3	57,4	58,1
Leitura inicial (mm)	-0,3238	-0,2920	-0,2746
Leitura 100s (mm)	-0,2856	-0,2639	-0,2498
Leitura final (mm)	-0,1950	-0,2322	-0,2139
Deformação Total (%)	0,221	0,104	0,104
Inclinação	1,85E-05	6,48E-06	7,31E-06
Corpo de prova	convc5a10	convc5a11	convc5a12
Mistura	Cimento Asfáltico Convencional		
Período envelhecimento	0 horas		
Altura média (mm)	57,8	58,4	58,4
Leitura inicial (mm)	0,0200	-0,4193	0,0595
Leitura 100s (mm)	0,2056	-0,2187	0,2008
Leitura final (mm)	0,3258	-0,1924	0,2814
Deformação Total (%)	0,529	0,388	0,380
Inclinação	2,45E-05	5,36E-06	1,65E-05

Tabela B2. Resultados de deformação total do ensaio de fluência por compressão uniaxial dinâmica das misturas moldadas com cimento asfáltico modificado com polímero envelhecidas por um período de 0 horas.

Corpo de prova	polc2a10	polc2a11	polc2a12
Mistura	Cimento Asfáltico Modificado com Polímero		
Período envelhecimento	0 horas		
Altura média (mm)	59,5	58,8	59,5
Leitura inicial (mm)	0,0171	0,0274	0,0118
Leitura 100s (mm)	0,0802	0,1115	0,0748
Leitura final (mm)	0,1392	0,1960	0,1343
Deformação Total (%)	0,205	0,287	0,206
Inclinação	1,21E-05	1,72E-05	1,21E-05
Corpo de prova	polc3a10	polc3a11	polc3a12
Mistura	Cimento Asfáltico Modificado com Polímero		
Período envelhecimento	0 horas		
Altura média (mm)	59,1	58,9	58,4
Leitura inicial (mm)	0,0348	0,0094	0,0079
Leitura 100s (mm)	0,0868	0,0361	0,0535
Leitura final (mm)	0,1565	0,1512	0,2761
Deformação Total (%)	0,206	0,241	0,459
Inclinação	1,42E-05	2,35E-05	4,54E-05
Corpo de prova	polc4a10	polc4a11	polc4a12
Mistura	Cimento Asfáltico Modificado com Polímero		
Período envelhecimento	0 horas		
Altura média (mm)	58,1	58,1	58,7
Leitura inicial (mm)	-0,1806	-0,2361	0,0262
Leitura 100s (mm)	-0,1417	-0,1789	0,1182
Leitura final (mm)	0,0133	0,0730	0,1837
Deformação Total (%)	0,334	0,532	0,268
Inclinação	3,16E-05	5,14E-05	1,34E-05
Corpo de prova	polc5a10	polc5a11	polc5a12
Mistura	Cimento Asfáltico Modificado com Polímero		
Período envelhecimento	0 horas		
Altura média (mm)	58,8	59,0	58,7
Leitura inicial (mm)	-0,1796	0,0093	-0,2327
Leitura 100s (mm)	-0,0775	0,0851	-0,1454
Leitura final (mm)	0,1248	0,1799	0,0641
Deformação Total (%)	0,518	0,289	0,506
Inclinação	4,13E-05	1,93E-05	4,28E-05

Tabela B3. Resultados de deformação total do ensaio de fluência por compressão uniaxial dinâmica das misturas moldadas com cimento asfáltico modificado com borracha envelhecidas por um período de 0 horas.

Corpo de prova	borc2a10	borc2a11	borc2a12
Mistura	Cimento Asfáltico Modificado com Borracha		
Período envelhecimento	0 horas		
Altura média (mm)	61,4	59,6	60,7
Leitura inicial (mm)	0,0092	0,0116	-0,2789
Leitura 100s (mm)	0,0190	0,0383	-0,2569
Leitura final (mm)	0,0668	0,0688	-0,2088
Deformação Total (%)	0,094	0,096	0,116
Inclinação	9,75E-06	6,23E-06	9,83E-06
Corpo de prova	borc3a10	borc3a11	borc3a12
Mistura	Cimento Asfáltico Modificado com Borracha		
Período envelhecimento	0 horas		
Altura média (mm)	59,4	59,7	62,2
Leitura inicial (mm)	-0,2540	0,0292	0,0286
Leitura 100s (mm)	-0,1894	0,1027	0,0514
Leitura final (mm)	-0,1280	0,1575	0,1207
Deformação Total (%)	0,212	0,215	0,148
Inclinação	1,25E-05	1,12E-05	1,41E-05
Corpo de prova	borc4a10	borc4a11	borc4a12
Mistura	Cimento Asfáltico Modificado com Borracha		
Período envelhecimento	0 horas		
Altura média (mm)	59,6	58,9	58,9
Leitura inicial (mm)	0,0585	0,0346	0,0458
Leitura 100s (mm)	0,1819	0,0799	0,1639
Leitura final (mm)	0,2250	0,2752	0,2734
Deformação Total (%)	0,279	0,408	0,386
Inclinação	8,78E-06	3,98E-05	2,24E-05
Corpo de prova	borc5a10	borc5a11	borc5a12
Mistura	Cimento Asfáltico Modificado com Borracha		
Período envelhecimento	0 horas		
Altura média (mm)	60,6	58,7	58,8
Leitura inicial (mm)	0,0155	0,0138	0,0070
Leitura 100s (mm)	0,0326	0,0288	0,0342
Leitura final (mm)	0,0783	0,0716	0,0750
Deformação Total (%)	0,104	0,099	0,116
Inclinação	9,33E-06	8,74E-06	8,33E-06



Tabela B4. Resultados de deformação total do ensaio de fluência por compressão uniaxial dinâmica das misturas moldadas com cimento asfáltico convencional envelhecidas por um período de 4 horas.

Corpo de prova	convc2p14	convc2p15	convc2p16
Mistura	Cimento Asfáltico Convencional		
Período envelhecimento	4 horas		
Altura média (mm)	61,6	60,5	60,0
Leitura inicial (mm)	-0,4387	-0,4498	-0,4491
Leitura 100s (mm)	-0,4040	-0,3741	-0,3929
Leitura final (mm)	-0,2406	-0,1141	-0,1978
Deformação Total (%)	0,322	0,555	0,419
Inclinação	3,34E-05	5,32E-05	3,99E-05
Corpo de prova	convc3p13	convc3p14	convc3p15
Mistura	Cimento Asfáltico Convencional		
Período envelhecimento	4 horas		
Altura média (mm)	59,3	59,8	59,4
Leitura inicial (mm)	-0,4429	-0,4457	-0,4497
Leitura 100s (mm)	-0,2932	-0,4144	-0,3809
Leitura final (mm)	0,1101	-0,3042	-0,0986
Deformação Total (%)	0,932	0,237	0,591
Inclinação	8,24E-05	2,25E-05	5,78E-05
Corpo de prova	convc4p13	convc4p14	convc4p17
Mistura	Cimento Asfáltico Convencional		
Período envelhecimento	4 horas		
Altura média (mm)	60,0	59,5	59,4
Leitura inicial (mm)	-0,2695	0,0033	0,0086
Leitura 100s (mm)	-0,2362	0,0270	0,0336
Leitura final (mm)	-0,1412	0,0515	0,0814
Deformação Total (%)	0,214	0,081	0,123
Inclinação	1,94E-05	5,02E-06	9,79E-06
Corpo de prova	convc5p14	convc5p15	convc5p16
Mistura	Cimento Asfáltico Convencional		
Período envelhecimento	4 horas		
Altura média (mm)	59,3	59,2	58,0
Leitura inicial (mm)	-0,2814	-0,3674	-0,3271
Leitura 100s (mm)	-0,2469	-0,3141	-0,2851
Leitura final (mm)	-0,0663	-0,0736	-0,0980
Deformação Total (%)	0,363	0,496	0,395
Inclinação	3,69E-05	4,92E-05	3,83E-05

Tabela B5. Resultados de deformação total do ensaio de fluência por compressão uniaxial dinâmica das misturas moldadas com cimento asfáltico modificado com polímero envelhecidas por um período de 4 horas.

Corpo de prova	polc2p13	polc2p16	polc2p17
Mistura	Cimento Asfáltico Modificado com Polímero		
Período envelhecimento	4 horas		
Altura média (mm)	50,4	60,6	60,2
Leitura inicial (mm)	-0,3028	-0,3752	-0,3323
Leitura 100s (mm)	-0,2737	-0,3452	-0,3022
Leitura final (mm)	-0,1276	-0,2047	-0,1739
Deformação Total (%)	0,347	0,281	0,263
Inclinação	2,99E-05	2,88E-05	2,63E-05

Corpo de prova	polc3p14	polc3p15	polc3p16
Mistura	Cimento Asfáltico Modificado com Polímero		
Período envelhecimento	4 horas		
Altura média (mm)	57,7	58,8	58,6
Leitura inicial (mm)	-0,4224	-0,4596	-0,4270
Leitura 100s (mm)	-0,3058	-0,4066	-0,3270
Leitura final (mm)	-0,0311	-0,3182	-0,1515
Deformação Total (%)	0,678	0,240	0,470
Inclinação	5,62E-05	1,81E-05	3,59E-05

Corpo de prova	polc4p13	polc4p15	polc4p17
Mistura	Cimento Asfáltico Modificado com Polímero		
Período envelhecimento	4 horas		
Altura média (mm)	59,2	59,7	60,5
Leitura inicial (mm)	-0,4301	-0,4347	-0,4560
Leitura 100s (mm)	-0,3101	-0,3290	-0,4065
Leitura final (mm)	-0,1024	-0,1061	-0,3439
Deformação Total (%)	0,553	0,185	0,185
Inclinação	4,25E-05	1,28E-05	1,28E-05

Corpo de prova	polc5p13	polc5p14	polc5p15
Mistura	Cimento Asfáltico Modificado com Polímero		
Período envelhecimento	4 horas		
Altura média (mm)	59,0	58,4	58,6
Leitura inicial (mm)	0,0165	-0,2780	-0,2609
Leitura 100s (mm)	0,0437	-0,2539	-0,2461
Leitura final (mm)	0,1012	-0,1356	-0,1790
Deformação Total (%)	0,144	0,244	0,140
Inclinação	1,18E-05	2,42E-05	1,37E-05

Tabela B6. Resultados de deformação total do ensaio de fluência por compressão uniaxial dinâmica das misturas moldadas com cimento asfáltico modificado com borracha envelhecidas por um período de 8 horas.

Corpo de prova	borc2p13	borc2p15	borc2p17
Mistura	Cimento Asfáltico Modificado com Borracha		
Período envelhecimento	4 horas		
Altura média (mm)	63,8	60,5	61,1
Leitura inicial (mm)	0,0226	0,0143	0,0130
Leitura 100s (mm)	0,0272	0,0374	0,0230
Leitura final (mm)	0,0509	0,1340	0,0489
Deformação Total (%)	0,044	0,198	0,059
Inclinação	4,85E-06	1,98E-05	5,32E-06
Corpo de prova	borc3p13	borc3p14	borc3p16
Mistura	Cimento Asfáltico Modificado com Borracha		
Período envelhecimento	4 horas		
Altura média (mm)	60,8	59,9	59,2
Leitura inicial (mm)	-0,2979	0,0109	-0,2784
Leitura 100s (mm)	-0,2777	0,0281	-0,2444
Leitura final (mm)	-0,1919	0,0812	-0,1340
Deformação Total (%)	0,174	0,117	0,244
Inclinação	1,75E-05	1,09E-05	2,26E-05
Corpo de prova	borc4p14	borc4p16	borc4p17
Mistura	Cimento Asfáltico Modificado com Borracha		
Período envelhecimento	4 horas		
Altura média (mm)	60,1	60,5	59,5
Leitura inicial (mm)	0,0209	0,0081	0,0143
Leitura 100s (mm)	0,0291	0,0297	0,0314
Leitura final (mm)	0,0532	0,1170	0,0922
Deformação Total (%)	0,054	0,180	0,131
Inclinação	4,93E-06	1,78E-05	1,24E-05
Corpo de prova	borc5p14	borc5p15	borc5p16
Mistura	Cimento Asfáltico Modificado com Borracha		
Período envelhecimento	4 horas		
Altura média (mm)	58,5	59,0	60,1
Leitura inicial (mm)	0,0097	0,0069	0,0126
Leitura 100s (mm)	0,0351	0,0430	0,0241
Leitura final (mm)	0,1563	0,1939	0,0562
Deformação Total (%)	0,250	0,317	0,072
Inclinação	2,48E-05	3,09E-05	6,56E-06

Tabela B7. Resultados de deformação total do ensaio de fluência por compressão uniaxial dinâmica das misturas moldadas com cimento asfáltico convencional envelhecidas por um período de 8 horas.

Corpo de prova	convc2p19	convc2p20	convc2p21
Mistura	Cimento Asfáltico Convencional		
Período envelhecimento	8 horas		
Altura média (mm)	60,7	61,1	61,3
Leitura inicial (mm)	0,0093	0,0317	0,0105
Leitura 100s (mm)	0,0350	0,0509	0,0414
Leitura final (mm)	0,1309	0,1510	0,1717
Deformação Total (%)	0,201	0,195	0,263
Inclinação	1,96E-05	2,05E-05	2,66E-05
Corpo de prova	convc3p18	convc3p21	convc3p22
Mistura	Cimento Asfáltico Convencional		
Período envelhecimento	8 horas		
Altura média (mm)	60,1	60,0	58,9
Leitura inicial (mm)	-0,4435	-0,4342	-0,4361
Leitura 100s (mm)	-0,3832	-0,2969	-0,3706
Leitura final (mm)	-0,0366	-0,0180	-0,1084
Deformação Total (%)	0,677	0,694	0,556
Inclinação	7,09E-05	5,71E-05	5,37E-05
Corpo de prova	convc4p19	convc4p21	convc4p22
Mistura	Cimento Asfáltico Convencional		
Período envelhecimento	8 horas		
Altura média (mm)	59,1	58,8	58,8
Leitura inicial (mm)	0,0201	-0,2640	-0,3236
Leitura 100s (mm)	0,0685	-0,2142	-0,2848
Leitura final (mm)	0,2922	0,0089	-0,1198
Deformação Total (%)	0,460	0,464	0,347
Inclinação	4,58E-05	4,56E-05	3,38E-05
Corpo de prova	convc5p20	convc5p21	convc5p22
Mistura	Cimento Asfáltico Convencional		
Período envelhecimento	8 horas		
Altura média (mm)	58,8	58,4	58,4
Leitura inicial (mm)	-0,3290	-0,3397	-0,3750
Leitura 100s (mm)	-0,2833	-0,2929	-0,3268
Leitura final (mm)	-0,1169	-0,0867	-0,1298
Deformação Total (%)	0,361	0,433	0,420
Inclinação	3,40E-05	4,22E-05	4,03E-05

Tabela B8. Resultados de deformação total do ensaio de fluência por compressão uniaxial dinâmica das misturas moldadas com cimento asfáltico modificado com polímero envelhecidas por um período de 8 horas.

Corpo de prova	polc2p18	polc2p21	polc2p22
Mistura	Cimento Asfáltico Modificado com Polímero		
Período envelhecimento	8 horas		
Altura média (mm)	60,5	60,7	61,4
Leitura inicial (mm)	-0,4237	0,0202	0,0425
Leitura 100s (mm)	-0,3857	0,0612	0,0892
Leitura final (mm)	-0,2810	0,1902	0,1979
Deformação Total (%)	0,236	0,280	0,253
Inclinação	2,14E-05	2,64E-05	2,22E-05
Corpo de prova	polc3p19	polc3p21	polc3p22
Mistura	Cimento Asfáltico Modificado com Polímero		
Período envelhecimento	8 horas		
Altura média (mm)	59,9	59,2	60,2
Leitura inicial (mm)	0,0217	-0,3557	-0,3970
Leitura 100s (mm)	0,1375	-0,3274	-0,2885
Leitura final (mm)	0,2862	-0,1374	0,0286
Deformação Total (%)	0,442	0,369	0,707
Inclinação	3,04E-05	3,88E-05	6,49E-05
Corpo de prova	polc4p18	polc4p20	polc4p21
Mistura	Cimento Asfáltico Modificado com Polímero		
Período envelhecimento	8 horas		
Altura média (mm)	60,2	59,3	59,5
Leitura inicial (mm)	-0,4322	-0,4416	-0,4569
Leitura 100s (mm)	-0,4058	-0,3678	-0,4284
Leitura final (mm)	-0,3198	-0,2630	-0,3214
Deformação Total (%)	0,187	0,301	0,228
Inclinação	1,76E-05	2,14E-05	2,18E-05
Corpo de prova	polc5p18	polc5p19	polc5p20
Mistura	Cimento Asfáltico Modificado com Polímero		
Período envelhecimento	8 horas		
Altura média (mm)	58,1	58,5	60,4
Leitura inicial (mm)	-0,2819	-0,2652	-0,2618
Leitura 100s (mm)	-0,2708	-0,2478	-0,2451
Leitura final (mm)	-0,1719	-0,2478	-0,1650
Deformação Total (%)	0,189	0,194	0,160
Inclinação	2,02E-05	1,97E-05	1,64E-05

Tabela B9. Resultados de deformação total do ensaio de fluência por compressão uniaxial dinâmica das misturas moldadas com cimento asfáltico modificado com borracha envelhecidas por um período de 8 horas.

Corpo de prova	borc2p19	borc2p20	borc2p21
Mistura	Cimento Asfáltico Modificado com Borracha		
Período envelhecimento	8 horas		
Altura média (mm)	60,8	60,9	62,0
Leitura inicial (mm)	-0,2852	-0,2712	0,0046
Leitura 100s (mm)	-0,2717	-0,2537	0,0178
Leitura final (mm)	-0,2123	-0,2144	0,0503
Deformação Total (%)	0,120	0,093	0,074
Inclinação	1,22E-05	8,04E-06	6,65E-06
Corpo de prova	borc3p19	borc3p20	borc3p21
Mistura	Cimento Asfáltico Modificado com Borracha		
Período envelhecimento	8 horas		
Altura média (mm)	60,1	60,4	61,8
Leitura inicial (mm)	0,0092	-0,2806	-0,2883
Leitura 100s (mm)	0,0273	-0,2561	-0,2700
Leitura final (mm)	0,0916	-0,1732	-0,2112
Deformação Total (%)	0,137	0,178	0,125
Inclinação	1,31E-05	1,70E-05	1,20E-05
Corpo de prova	borc4p18	borc4p21	borc4p22
Mistura	Cimento Asfáltico Modificado com Borracha		
Período envelhecimento	8 horas		
Altura média (mm)	62,4	61,0	59,7
Leitura inicial (mm)	0,0228	0,0105	0,0265
Leitura 100s (mm)	0,0297	0,0252	0,0388
Leitura final (mm)	0,0542	0,0507	0,0834
Deformação Total (%)	0,050	0,066	0,095
Inclinação	5,02E-06	5,20E-06	9,10E-06
Corpo de prova	borc5p19	borc5p21	borc5p22
Mistura	Cimento Asfáltico Modificado com Borracha		
Período envelhecimento	8 horas		
Altura média (mm)	64,0	60,3	62,8
Leitura inicial (mm)	0,0122	0,0118	0,0097
Leitura 100s (mm)	0,0244	0,0202	0,0198
Leitura final (mm)	0,0624	0,0501	0,0428
Deformação Total (%)	0,078	0,064	0,053
Inclinação	7,77E-06	6,11E-06	4,72E-06

Tabela C1. Resultados do ensaio de resistência à tração por compressão diametral para as misturas asfálticas envelhecidas por um período de 4 horas.

Teor %	Asfalto convencional		Asfalto modificado com polímero		Asfalto modificado com borracha	
	Res. Tração MPa	Carga kgf	Res. Tração MPa	Carga kgf	Res. Tração MPa	Carga kgf
5,0	1,97	1911,0	2,35	2243,2	1,75	1688,1
5,5	2,35	2252,3	2,56	2420,6	2,16	2070,3
6,0	2,18	2074,8	2,87	2693,6	2,30	2215,9
6,5	1,71	1624,4	2,25	2106,7	2,39	2261,4

Tabela C2. Resultados do ensaio de resistência à tração por compressão diametral para as misturas asfálticas envelhecidas por um período de 8 horas.

Teor %	Asfalto convencional		Asfalto modificado com polímero		Asfalto modificado com borracha	
	Res. Tração MPa	Carga kgf	Res. Tração MPa	Carga kgf	Res. Tração MPa	Carga kgf
5,0	2,08	2047,5	2,19	2147,6	1,37	1387,8
5,5	2,47	2366,0	2,64	2548,0	2,18	2102,1
6,0	2,13	2002,0	2,87	2748,2	2,25	2202,2
6,5	2,17	2052,1	2,45	2329,6	2,19	2161,3

Tabela D1. Resultados do ensaio de módulo de resiliência por compressão diametral dinâmica para as misturas asfálticas moldadas com cimento asfáltico convencional (teor 5,0%) envelhecidas por um período de 4 horas.

Corpo-de-Prova			convc2p15	
Mistura			Asfalto Convencional	
Período de envelhecimento			4 horas	
Altura média (cm)			6,03	
Tempo (s)	Carga (kgf)	Deslocamento (mm)	MR (MPa)	MRmédio (MPa)
300	270	0,0062	4072	3986
400		0,0063	4021	
500		0,0066	3864	

Corpo-de-Prova			convc2p16	
Mistura			Asfalto Convencional	
Período de envelhecimento			4 horas	
Altura média (cm)			5,96	
Tempo (s)	Carga (kgf)	Deslocamento (mm)	MR (MPa)	MRmédio (MPa)
300	271	0,0089	2888	2969
400		0,0086	3019	
500		0,0086	2999	

Corpo-de-Prova			convc2p17	
Mistura			Asfalto Convencional	
Período de envelhecimento			4 horas	
Altura média (cm)			6,03	
Tempo (s)	Carga (kgf)	Deslocamento (mm)	MR (MPa)	MRmédio (MPa)
300	276	0,0057	4554	4445
400		0,0061	4268	
500		0,0058	4512	

Tabela D2. Resultados do ensaio de módulo de resiliência por compressão diametral dinâmica para as misturas asfálticas moldadas com cimento asfáltico convencional (teor 5,5%) envelhecidas por um período de 4 horas.

Corpo-de-Prova			convc3p13	
Mistura			Asfalto Convencional	
Período de envelhecimento			4 horas	
Altura média (cm)			5,91	
Tempo (s)	Carga (kgf)	Deslocamento (mm)	MR (MPa)	MRmédio (MPa)
300	276	0,0070	3810	3877
400		0,0070	3774	
500		0,0066	4048	
Corpo-de-Prova			convc3p15	
Mistura			Asfalto Convencional	
Período de envelhecimento			4 horas	
Altura média (cm)			5,90	
Tempo (s)	Carga (kgf)	Deslocamento (mm)	MR (MPa)	MRmédio (MPa)
300	281	0,0076	3581	3887
400		0,0064	4230	
500		0,0070	3850	
Corpo-de-Prova			convc3p17	
Mistura			Asfalto Convencional	
Período de envelhecimento			4 horas	
Altura média (cm)			6,00	
Tempo (s)	Carga (kgf)	Deslocamento (mm)	MR (MPa)	MRmédio (MPa)
300	280	0,0055	4839	4651
400		0,0054	4922	
500		0,0063	4194	

Tabela D3. Resultados do ensaio de módulo de resiliência por compressão diametral dinâmica para as misturas asfálticas moldadas com cimento asfáltico convencional (teor 6,0%) envelhecidas por um período de 4 horas.

Corpo-de-Prova			convc4p13	
Mistura			Asfalto Convencional	
Período de envelhecimento			4 horas	
Altura média (cm)			5,98	
Tempo (s)	Carga (kgf)	Deslocamento (mm)	MR (MPa)	MRmédio (MPa)
300	272	0,0068	3787	3834
400		0,0069	3754	
500		0,0065	3961	
Corpo-de-Prova			convc4p15	
Mistura			Asfalto Convencional	
Período de envelhecimento			4 horas	
Altura média (cm)			5,98	
Tempo (s)	Carga (kgf)	Deslocamento (mm)	MR (MPa)	MRmédio (MPa)
300	272	0,0060	4289	4130
400		0,0064	4068	
500		0,0064	4032	
Corpo-de-Prova			convc4p17	
Mistura			Asfalto Convencional	
Período de envelhecimento			4 horas	
Altura média (cm)			5,92	
Tempo (s)	Carga (kgf)	Deslocamento (mm)	MR (MPa)	MRmédio (MPa)
300	278	0,0075	3586	3574
400		0,0075	3559	
500		0,0075	3579	

Tabela D4. Resultados do ensaio de módulo de resiliência por compressão diametral dinâmica para as misturas asfálticas moldadas com cimento asfáltico convencional (teor 6,5%) envelhecidas por um período de 4 horas.

Corpo-de-Prova			convc5p14	
Mistura			Asfalto Convencional	
Período de envelhecimento			4 horas	
Altura média (cm)			5,86	
Tempo (s)	Carga (kgf)	Deslocamento (mm)	MR (MPa)	MRmédio (MPa)
300	280	0,0128	2116	2125
400		0,0128	2125	
500		0,0127	2134	

Corpo-de-Prova			convc5p16	
Mistura			Asfalto Convencional	
Período de envelhecimento			4 horas	
Altura média (cm)			5,76	
Tempo (s)	Carga (kgf)	Deslocamento (mm)	MR (MPa)	MRmédio (MPa)
300	281	0,0076	3631	3540
400		0,0079	3521	
500		0,0080	3469	

Corpo-de-Prova			convc5p17	
Mistura			Asfalto Convencional	
Período de envelhecimento			4 horas	
Altura média (cm)			5,79	
Tempo (s)	Carga (kgf)	Deslocamento (mm)	MR (MPa)	MRmédio (MPa)
300	279	0,0082	3323	3366
400		0,0079	3467	
500		0,0083	3307	

Tabela D5. Resultados do ensaio de módulo de resiliência por compressão diametral dinâmica para as misturas asfálticas moldadas com cimento asfáltico modificado com polímero (teor 5,0%) envelhecidas por um período de 4 horas.

Corpo-de-Prova			polc2p15	
Mistura			Asfalto Polímero	
Período de envelhecimento			4 horas	
Altura média (cm)			5,96	
Tempo (s)	Carga (kgf)	Deslocamento (mm)	MR (MPa)	MRmédio (MPa)
300	276	0,0040	6579	7058
400		0,0034	7790	
500		0,0039	6806	
Corpo-de-Prova			polc2p16	
Mistura			Asfalto Polímero	
Período de envelhecimento			4 horas	
Altura média (cm)			6,03	
Tempo (s)	Carga (kgf)	Deslocamento (mm)	MR (MPa)	MRmédio (MPa)
300	278	0,0044	6011	5957
400		0,0046	5696	
500		0,0043	6162	
Corpo-de-Prova			polc2p17	
Mistura			Asfalto Polímero	
Período de envelhecimento			4 horas	
Altura média (cm)			6,00	
Tempo (s)	Carga (kgf)	Deslocamento (mm)	MR (MPa)	MRmédio (MPa)
300	278	0,0042	6325	6155
400		0,0045	5794	
500		0,0041	6346	

Tabela D6. Resultados do ensaio de módulo de resiliência por compressão diametral dinâmica para as misturas asfálticas moldadas com cimento asfáltico modificado com polímero (teor 5,5%) envelhecidas por um período de 4 horas.

Corpo-de-Prova			polc3p14	
Mistura			Asfalto Polímero	
Período de envelhecimento			4 horas	
Altura média (cm)			5,76	
Tempo (s)	Carga (kgf)	Deslocamento (mm)	MR (MPa)	MRmédio (MPa)
300	272	0,0039	6914	7575
400		0,0034	7921	
500		0,0034	7890	
Corpo-de-Prova			polc3p16	
Mistura			Asfalto Polímero	
Período de envelhecimento			4 horas	
Altura média (cm)			5,84	
Tempo (s)	Carga (kgf)	Deslocamento (mm)	MR (MPa)	MRmédio (MPa)
300	271	0,0044	5950	5752
400		0,0047	5636	
500		0,0047	5669	
Corpo-de-Prova			polc3p17	
Mistura			Asfalto Polímero	
Período de envelhecimento			4 horas	
Altura média (cm)			5,86	
Tempo (s)	Carga (kgf)	Deslocamento (mm)	MR (MPa)	MRmédio (MPa)
300	272	0,0032	8253	7248
400		0,0035	7501	
500		0,0044	5989	

Tabela D7. Resultados do ensaio de módulo de resiliência por compressão diametral dinâmica para as misturas asfálticas moldadas com cimento asfáltico modificado com polímero (teor 6,0%) envelhecidas por um período de 4 horas.

Corpo-de-Prova			polc4p13	
Mistura			Asfalto Polímero	
Período de envelhecimento			4 horas	
Altura média (cm)			5,90	
Tempo (s)	Carga (kgf)	Deslocamento (mm)	MR (MPa)	MRmédio (MPa)
300	274	0,0058	4511	4532
400		0,0057	4584	
500		0,0059	4501	
Corpo-de-Prova			polc4p14	
Mistura			Asfalto Polímero	
Período de envelhecimento			4 horas	
Altura média (cm)			5,95	
Tempo (s)	Carga (kgf)	Deslocamento (mm)	MR (MPa)	MRmédio (MPa)
300	273	0,0042	6220	6783
400		0,0037	7001	
500		0,0037	7129	
Corpo-de-Prova			polc4p17	
Mistura			Asfalto Polímero	
Período de envelhecimento			4 horas	
Altura média (cm)			6,05	
Tempo (s)	Carga (kgf)	Deslocamento (mm)	MR (MPa)	MRmédio (MPa)
300	271	0,0031	8263	7591
400		0,0038	6624	
500		0,0032	7886	

Tabela D8. Resultados do ensaio de módulo de resiliência por compressão diametral dinâmica para as misturas asfálticas moldadas com cimento asfáltico modificado com polímero (teor 6,5%) envelhecidas por um período de 4 horas.

Corpo-de-Prova			polc5p14	
Mistura			Asfalto Polímero	
Período de envelhecimento			4 horas	
Altura média (cm)			5,84	
Tempo (s)	Carga (kgf)	Deslocamento (mm)	MR (MPa)	MRmédio (MPa)
300	272	0,0049	5381	5335
400		0,0051	5171	
500		0,0049	5455	
Corpo-de-Prova			polc5p15	
Mistura			Asfalto Polímero	
Período de envelhecimento			4 horas	
Altura média (cm)			5,86	
Tempo (s)	Carga (kgf)	Deslocamento (mm)	MR (MPa)	MRmédio (MPa)
300	272	0,0030	8824	8616
400		0,0031	8393	
500		0,0031	8631	
Corpo-de-Prova			polc5p17	
Mistura			Asfalto Polímero	
Período de envelhecimento			4 horas	
Altura média (cm)			5,86	
Tempo (s)	Carga (kgf)	Deslocamento (mm)	MR (MPa)	MRmédio (MPa)
300	273	0,0044	6001	5890
400		0,0041	6387	
500		0,0050	5283	

Tabela D9. Resultados do ensaio de módulo de resiliência por compressão diametral dinâmica para as misturas asfálticas moldadas com cimento asfáltico modificado com borracha (teor 5,0%) envelhecidas por um período de 4 horas.

Corpo-de-Prova			borc2p13	
Mistura			Asfalto Borracha	
Período de envelhecimento			4 horas	
Altura média (cm)			6,38	
Tempo (s)	Carga (kgf)	Deslocamento (mm)	MR (MPa)	MRmédio (MPa)
300	272	0,0106	2293	2290
400		0,0105	2299	
500		0,0106	2276	
Corpo-de-Prova			borc2p15	
Mistura			Asfalto Borracha	
Período de envelhecimento			4 horas	
Altura média (cm)			6,04	
Tempo (s)	Carga (kgf)	Deslocamento (mm)	MR (MPa)	MRmédio (MPa)
300	276	0,0059	4438	4644
400		0,0055	4729	
500		0,0055	4764	
Corpo-de-Prova			borc2p16	
Mistura			Asfalto Borracha	
Período de envelhecimento			4 horas	
Altura média (cm)			6,37	
Tempo (s)	Carga (kgf)	Deslocamento (mm)	MR (MPa)	MRmédio (MPa)
300	275	0,0061	4010	3823
400		0,0065	3793	
500		0,0067	3667	

Tabela D10. Resultados do ensaio de módulo de resiliência por compressão diametral dinâmica para as misturas asfálticas moldadas com cimento asfáltico modificado com borracha (teor 5,5%) envelhecidas por um período de 4 horas.

Corpo-de-Prova			borc3p13	
Mistura			Asfalto Borracha	
Período de envelhecimento			4 horas	
Altura média (cm)			6,08	
Tempo (s)	Carga (kgf)	Deslocamento (mm)	MR (MPa)	MRmédio (MPa)
300	275	0,0053	4866	4641
400		0,0057	4518	
500		0,0057	4540	
Corpo-de-Prova			borc3p16	
Mistura			Asfalto Borracha	
Período de envelhecimento			4 horas	
Altura média (cm)			5,90	
Tempo (s)	Carga (kgf)	Deslocamento (mm)	MR (MPa)	MRmédio (MPa)
300	270	0,0110	2365	2425
400		0,0106	2454	
500		0,0106	2454	
Corpo-de-Prova			borc3p17	
Mistura			Asfalto Borracha	
Período de envelhecimento			4 horas	
Altura média (cm)			6,20	
Tempo (s)	Carga (kgf)	Deslocamento (mm)	MR (MPa)	MRmédio (MPa)
300	271	0,0061	4055	4441
400		0,0055	4507	
500		0,0052	4761	

Tabela D11. Resultados do ensaio de módulo de resiliência por compressão diametral dinâmica para as misturas asfálticas moldadas com cimento asfáltico modificado com borracha (6,0%) envelhecidas por um período de 4 horas.

Corpo-de-Prova			borc4p13	
Mistura			Asfalto Borracha	
Período de envelhecimento			4 horas	
Altura média (cm)			6,19	
Tempo (s)	Carga (kgf)	Deslocamento (mm)	MR (MPa)	MRmédio (MPa)
300	271	0,0047	5332	5280
400		0,0049	5127	
500		0,0046	5381	
Corpo-de-Prova			borc4p14	
Mistura			Asfalto Borracha	
Período de envelhecimento			4 horas	
Altura média (cm)			6,00	
Tempo (s)	Carga (kgf)	Deslocamento (mm)	MR (MPa)	MRmédio (MPa)
300	270	0,0056	4563	4342
400		0,0059	4352	
500		0,0062	4111	
Corpo-de-Prova			borc4p16	
Mistura			Asfalto Borracha	
Período de envelhecimento			4 horas	
Altura média (cm)			6,03	
Tempo (s)	Carga (kgf)	Deslocamento (mm)	MR (MPa)	MRmédio (MPa)
300	271	0,0052	4918	5216
400		0,0048	5321	
500		0,0047	5410	

Tabela D12. Resultados do ensaio de módulo de resiliência por compressão diametral dinâmica para as misturas asfálticas moldadas com cimento asfáltico modificado com borracha (6,5%) envelhecidas por um período de 4 horas.

Corpo-de-Prova			borc5p14	
Mistura			Asfalto Borracha	
Período de envelhecimento			4 horas	
Altura média (cm)			5,84	
Tempo (s)	Carga (kgf)	Deslocamento (mm)	MR (MPa)	MRmédio (MPa)
300	276	0,0067	4028	3938
400		0,0068	3972	
500		0,0070	3814	
Corpo-de-Prova			borc5p15	
Mistura			Asfalto Borracha	
Período de envelhecimento			4 horas	
Altura média (cm)			5,90	
Tempo (s)	Carga (kgf)	Deslocamento (mm)	MR (MPa)	MRmédio (MPa)
300	275	0,0060	4441	4356
400		0,0060	4372	
500		0,0062	4255	
Corpo-de-Prova			borc5p17	
Mistura			Asfalto Borracha	
Período de envelhecimento			4 horas	
Altura média (cm)			6,02	
Tempo (s)	Carga (kgf)	Deslocamento (mm)	MR (MPa)	MRmédio (MPa)
300	276	0,0086	3036	4142
400		0,0058	4478	
500		0,0053	4912	

Tabela D13. Resultados do ensaio de módulo de resiliência por compressão diametral dinâmica para as misturas asfálticas moldadas com cimento asfáltico convencional (teor 5,0%) envelhecidas por um período de 8 horas.

Corpo-de-Prova					convc2p19
Mistura					Asfalto Convencional
Período de envelhecimento					8 horas
Altura média (cm)					6,06
Tempo (s)	Carga (kgf)	Deslocamento (mm)	MR (MPa)	MRmédio (MPa)	
300	267	0,0052	4805	4762	
400		0,0055	4555		
500		0,0051	4927		
Corpo-de-Prova					convc2p21
Mistura					Asfalto Convencional
Período de envelhecimento					8 horas
Altura média (cm)					6,10
Tempo (s)	Carga (kgf)	Deslocamento (mm)	MR (MPa)	MRmédio (MPa)	
300	266	0,0058	4269	4339	
400		0,0057	4388		
500		0,0057	4360		
Corpo-de-Prova					convc2p22
Mistura					Asfalto Convencional
Período de envelhecimento					8 horas
Altura média (cm)					6,09
Tempo (s)	Carga (kgf)	Deslocamento (mm)	MR (MPa)	MRmédio (MPa)	
300	269	0,0047	5352	5298	
400		0,0050	5074		
500		0,0046	5469		

Tabela D14. Resultados do ensaio de módulo de resiliência por compressão diametral dinâmica para as misturas asfálticas moldadas com cimento asfáltico convencional (teor 5,5%) envelhecidas por um período de 8 horas.

Corpo-de-Prova			convc3p18	
Mistura			Asfalto Convencional	
Período de envelhecimento			8 horas	
Altura média (cm)			5,99	
Tempo (s)	Carga (kgf)	Deslocamento (mm)	MR (MPa)	MRmédio (MPa)
300	272	0,0059	4397	4455
400		0,0060	4323	
500		0,0056	4646	
Corpo-de-Prova			convc3p19	
Mistura			Asfalto Convencional	
Período de envelhecimento			8 horas	
Altura média (cm)			6,03	
Tempo (s)	Carga (kgf)	Deslocamento (mm)	MR (MPa)	MRmédio (MPa)
300	274	0,0053	4876	4737
400		0,0055	4692	
500		0,0056	4644	
Corpo-de-Prova			convc3p22	
Mistura			Asfalto Convencional	
Período de envelhecimento			8 horas	
Altura média (cm)			5,87	
Tempo (s)	Carga (kgf)	Deslocamento (mm)	MR (MPa)	MRmédio (MPa)
300	276	0,0056	4782	4538
400		0,0061	4377	
500		0,0060	4456	

Tabela D15. Resultados do ensaio de módulo de resiliência por compressão diametral dinâmica para as misturas asfálticas moldadas com cimento asfáltico convencional (teor 6,0%) envelhecidas por um período de 8 horas.

Corpo-de-Prova			convc4p18	
Mistura			Asfalto Convencional	
Período de envelhecimento			8 horas	
Altura média (cm)			5,93	
Tempo (s)	Carga (kgf)	Deslocamento (mm)	MR (MPa)	MRmédio (MPa)
300	275	0,0045	5820	5818
400		0,0042	6336	
500		0,0050	5297	
Corpo-de-Prova			convc4p21	
Mistura			Asfalto Convencional	
Período de envelhecimento			8 horas	
Altura média (cm)			5,86	
Tempo (s)	Carga (kgf)	Deslocamento (mm)	MR (MPa)	MRmédio (MPa)
300	276	0,0063	4232	4271
400		0,0065	4145	
500		0,0060	4435	
Corpo-de-Prova			convc4p22	
Mistura			Asfalto Convencional	
Período de envelhecimento			8 horas	
Altura média (cm)			5,85	
Tempo (s)	Carga (kgf)	Deslocamento (mm)	MR (MPa)	MRmédio (MPa)
300	273	0,0055	4840	4412
400		0,0067	3979	
500		0,0060	4416	

Tabela D16. Resultados do ensaio de módulo de resiliência por compressão diametral dinâmica para as misturas asfálticas moldadas com cimento asfáltico convencional (teor 6,5 %) envelhecidas por um período de 8 horas.

Corpo-de-Prova			convc5p19	
Mistura			Asfalto Convencional	
Período de envelhecimento			8 horas	
Altura média (cm)			5,94	
Tempo (s)	Carga (kgf)	Deslocamento (mm)	MR (MPa)	MRmédio (MPa)
300	275	0,0058	4512	4519
400		0,0058	4534	
500		0,0058	4512	
Corpo-de-Prova			convc5p21	
Mistura			Asfalto Convencional	
Período de envelhecimento			8 horas	
Altura média (cm)			5,80	
Tempo (s)	Carga (kgf)	Deslocamento (mm)	MR (MPa)	MRmédio (MPa)
300	272	0,0071	3731	3802
400		0,0069	3874	
500		0,0070	3801	
Corpo-de-Prova			convc5p22	
Mistura			Asfalto Convencional	
Período de envelhecimento			8 horas	
Altura média (cm)			5,81	
Tempo (s)	Carga (kgf)	Deslocamento (mm)	MR (MPa)	MRmédio (MPa)
300	275	0,0080	3338	3641
400		0,0070	3842	
500		0,0072	3743	

Tabela D17. Resultados do ensaio de módulo de resiliência por compressão diametral dinâmica para as misturas asfálticas moldadas com cimento asfáltico modificado com polímero (teor 5,0%) envelhecidas por um período de 8 horas.

Corpo-de-Prova			polc2p18	
Mistura			Asfalto Polímero	
Período de envelhecimento			8 horas	
Altura média (cm)			6,03	
Tempo (s)	Carga (kgf)	Deslocamento (mm)	MR (MPa)	MRmédio (MPa)
300	271	0,0038	6774	7021
400		0,0038	6798	
500		0,0034	7489	
Corpo-de-Prova			polc2p20	
Mistura			Asfalto Polímero	
Período de envelhecimento			8 horas	
Altura média (cm)			6,05	
Tempo (s)	Carga (kgf)	Deslocamento (mm)	MR (MPa)	MRmédio (MPa)
300	272	0,0038	6647	6229
400		0,0044	5784	
500		0,0041	6256	
Corpo-de-Prova			polc2p21	
Mistura			Asfalto Polímero	
Período de envelhecimento			8 horas	
Altura média (cm)			6,07	
Tempo (s)	Carga (kgf)	Deslocamento (mm)	MR (MPa)	MRmédio (MPa)
300	272	0,0035	7376	7361
400		0,0036	7128	
500		0,0034	7580	

Tabela D18. Resultados do ensaio de módulo de resiliência por compressão diametral dinâmica para as misturas asfálticas moldadas com cimento asfáltico modificado com polímero (teor 5,5%) envelhecidas por um período de 8 horas.

Corpo-de-Prova			polc3p19	
Mistura			Asfalto Polímero	
Período de envelhecimento			8 horas	
Altura média (cm)			5,97	
Tempo (s)	Carga (kgf)	Deslocamento (mm)	MR (MPa)	MRmédio (MPa)
300	271	0,0034	7588	7790
400		0,0027	9584	
500		0,0042	6199	
Corpo-de-Prova			polc3p20	
Mistura			Asfalto Polímero	
Período de envelhecimento			8 horas	
Altura média (cm)			5,99	
Tempo (s)	Carga (kgf)	Deslocamento (mm)	MR (MPa)	MRmédio (MPa)
300	268	0,0040	6398	6571
400		0,0040	6344	
500		0,0037	6972	
Corpo-de-Prova			polc3p21	
Mistura			Asfalto Polímero	
Período de envelhecimento			8 horas	
Altura média (cm)			5,92	
Tempo (s)	Carga (kgf)	Deslocamento (mm)	MR (MPa)	MRmédio (MPa)
300	268	0,0035	7281	7239
400		0,0038	6853	
500		0,0034	7582	

Tabela D19. Resultados do ensaio de módulo de resiliência por compressão diametral dinâmica para as misturas asfálticas moldadas com cimento asfáltico modificado com polímero (teor 6,0%) envelhecidas por um período de 8 horas.

Corpo-de-Prova			polc4p18	
Mistura			Asfalto Polímero	
Período de envelhecimento			8 horas	
Altura média (cm)			6,01	
Tempo (s)	Carga (kgf)	Deslocamento (mm)	MR (MPa)	MRmédio (MPa)
300	271	0,0037	6997	7159
400		0,0034	7431	
500		0,0036	7048	
Corpo-de-Prova			polc4p20	
Mistura			Asfalto Polímero	
Período de envelhecimento			8 horas	
Altura média (cm)			5,93	
Tempo (s)	Carga (kgf)	Deslocamento (mm)	MR (MPa)	MRmédio (MPa)
300	270	0,0038	6831	7195
400		0,0034	7672	
500		0,0037	7082	
Corpo-de-Prova			polc4p22	
Mistura			Asfalto Polímero	
Período de envelhecimento			8 horas	
Altura média (cm)			5,95	
Tempo (s)	Carga (kgf)	Deslocamento (mm)	MR (MPa)	MRmédio (MPa)
300	268	0,0037	6945	7404
400		0,0036	7193	
500		0,0032	8074	

Tabela D20. Resultados do ensaio de módulo de resiliência por compressão diametral dinâmica para as misturas asfálticas moldadas com cimento asfáltico modificado com polímero (teor 6,5%) envelhecidas por um período de 8 horas.

Corpo-de-Prova		polc5p19		
Mistura		Asfalto Polímero		
Período de envelhecimento		8 horas		
Altura média (cm)		5,86		
Tempo (s)	Carga (kgf)	Deslocamento (mm)	MR (MPa)	MRmédio (MPa)
300	272	0,0037	7118	7446
400		0,0035	7640	
500		0,0035	7581	
Corpo-de-Prova		polc5p20		
Mistura		Asfalto Polímero		
Período de envelhecimento		8 horas		
Altura média (cm)		6,03		
Tempo (s)	Carga (kgf)	Deslocamento (mm)	MR (MPa)	MRmédio (MPa)
300	271	0,0034	7470	6664
400		0,0041	6169	
500		0,0040	6353	
Corpo-de-Prova		polc5p22		
Mistura		Asfalto Polímero		
Período de envelhecimento		8 horas		
Altura média (cm)		5,82		
Tempo (s)	Carga (kgf)	Deslocamento (mm)	MR (MPa)	MRmédio (MPa)
300	272	0,0036	7348	7338
400		0,0038	7036	
500		0,0035	7629	

Tabela D21. Resultados do ensaio de módulo de resiliência por compressão diametral dinâmica para as misturas asfálticas moldadas com cimento asfáltico modificado com borracha (teor 5,0%) envelhecidas por um período de 8 horas.

Corpo-de-Prova			borc2p20	
Mistura			Asfalto Borracha	
Período de envelhecimento			8 horas	
Altura média (cm)			6,17	
Tempo (s)	Carga (kgf)	Deslocamento (mm)	MR (MPa)	MRmédio (MPa)
300	273	0,0057	4401	4334
400		0,0058	4368	
500		0,0060	4232	
Corpo-de-Prova			borc2p21	
Mistura			Asfalto Borracha	
Período de envelhecimento			8 horas	
Altura média (cm)			6,19	
Tempo (s)	Carga (kgf)	Deslocamento (mm)	MR (MPa)	MRmédio (MPa)
300	278	0,0065	3917	3914
400		0,0065	3926	
500		0,0065	3900	
Corpo-de-Prova			borc2p22	
Mistura			Asfalto Borracha	
Período de envelhecimento			8 horas	
Altura média (cm)			6,37	
Tempo (s)	Carga (kgf)	Deslocamento (mm)	MR (MPa)	MRmédio (MPa)
300	272	0,0056	4308	4278
400		0,0059	4140	
500		0,0055	4386	

Tabela D22. Resultados do ensaio de módulo de resiliência por compressão diametral dinâmica para as misturas asfálticas moldadas com cimento asfáltico modificado com borracha (teor 5,5%) envelhecidas por um período de 8 horas.

Corpo-de-Prova			borc3p18	
Mistura			Asfalto Borracha	
Período de envelhecimento			8 horas	
Altura média (cm)			5,99	
Tempo (s)	Carga (kgf)	Deslocamento (mm)	MR (MPa)	MRmédio (MPa)
300	271	0,0059	4347	4096
400		0,0064	4004	
500		0,0065	3939	
Corpo-de-Prova			borc3p19	
Mistura			Asfalto Borracha	
Período de envelhecimento			8 horas	
Altura média (cm)			6,01	
Tempo (s)	Carga (kgf)	Deslocamento (mm)	MR (MPa)	MRmédio (MPa)
300	274	0,0048	5396	5594
400		0,0052	5007	
500		0,0041	6380	
Corpo-de-Prova			borc3p20	
Mistura			Asfalto Borracha	
Período de envelhecimento			8 horas	
Altura média (cm)			6,01	
Tempo (s)	Carga (kgf)	Deslocamento (mm)	MR (MPa)	MRmédio (MPa)
300	275	0,0060	4331	4384
400		0,0058	4460	
500		0,0060	4360	

Tabela D23. Resultados do ensaio de módulo de resiliência por compressão diametral dinâmica para as misturas asfálticas moldadas com cimento asfáltico modificado com borracha (teor 6,0%) envelhecidas por um período de 8 horas.

Corpo-de-Prova			borc4p20	
Mistura			Asfalto Borracha	
Período de envelhecimento			8 horas	
Altura média (cm)			5,95	
Tempo (s)	Carga (kgf)	Deslocamento (mm)	MR (MPa)	MRmédio (MPa)
300	271	0,0060	4287	4197
400		0,0059	4386	
500		0,0066	3916	
Corpo-de-Prova			borc4p21	
Mistura			Asfalto Borracha	
Período de envelhecimento			8 horas	
Altura média (cm)			6,10	
Tempo (s)	Carga (kgf)	Deslocamento (mm)	MR (MPa)	MRmédio (MPa)
300	266	0,0050	4917	5397
400		0,0043	5807	
500		0,0045	5468	
Corpo-de-Prova			borc4p22	
Mistura			Asfalto Borracha	
Período de envelhecimento			8 horas	
Altura média (cm)			5,94	
Tempo (s)	Carga (kgf)	Deslocamento (mm)	MR (MPa)	MRmédio (MPa)
300	267	0,0044	5841	5623
400		0,0045	5646	
500		0,0047	5382	

Tabela D24. Resultados do ensaio de módulo de resiliência por compressão diametral dinâmica para as misturas asfálticas moldadas com cimento asfáltico modificado com borracha (teor 6,5%) envelhecidas por um período de 8 horas.

Corpo-de-Prova			borc5p18	
Mistura			Asfalto Borracha	
Período de envelhecimento			8 horas	
Altura média (cm)			6,17	
Tempo (s)	Carga (kgf)	Deslocamento (mm)	MR (MPa)	MRmédio (MPa)
300	271	0,0042	5952	5818
400		0,0043	5733	
500		0,0043	5768	
Corpo-de-Prova			borc5p21	
Mistura			Asfalto Borracha	
Período de envelhecimento			8 horas	
Altura média (cm)			6,03	
Tempo (s)	Carga (kgf)	Deslocamento (mm)	MR (MPa)	MRmédio (MPa)
300	272	0,0042	6156	6112
400		0,0045	5734	
500		0,0040	6446	
Corpo-de-Prova			borc5p22	
Mistura			Asfalto Borracha	
Período de envelhecimento			8 horas	
Altura média (cm)			6,29	
Tempo (s)	Carga (kgf)	Deslocamento (mm)	MR (MPa)	MRmédio (MPa)
300	272	0,0047	5279	5541
400		0,0044	5550	
500		0,0042	5794	