Serviço de Pós-Graduação

JSP

EXEMPLAR REV. 0

Data de entrada no Serviço: 22/08/02

Ass.:

ESTUDO EM LABORATÓRIO DO DESEMPENHO DE CONCRETO ASFÁLTICO USINADO A QUENTE EMPREGANDO LIGANTE TIPO ASFALTO-BORRACHA

Adalberto Leandro Faxina

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 Transportes.

Orientador: Prof. Associado Manoel Henrique Alba Sória

DEDALUS - Acervo - EESC

31100037056

São Carlos
2002

Class.	TESE - EESC
Cut.	2795
Tombo	T 0181/02
Sysno	4264004

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

F281e Faxina, Adalberto Leandro
Estudo em laboratório do desempenho de concreto
asfáltico usinado a quente empregando ligante tipo
asfalto-borracha / Adalberto Leandro Faxina.
-- São Carlos, 2002.

Dissertação (Mestrado) -- Escola de Engenharia de
São Carlos-Universidade de São Paulo, 2002.
Área : Transportes.
Orientador: Prof. Assoc. Manoel Henrique Alba
Sória.

1. Ligante asfalto-borracha. 2. Processo úmido.
3. Concreto asfáltico usinado a quente. 4. Ensaio de
laboratório. I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Engenheiro **ADALBERTO LEANDRO FAXINA**

Dissertação defendida e julgada em 18-07-2002 perante a Comissão Julgadora:

Prof. Assoc. **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

Dra. **LENI FIGUEIREDO MATHIAS LEITE**
(Petróleo Brasileiro S.A. - PETROBRÁS/RJ)

aprovado

Prof. Assoc. **JOSÉ REYNALDO ANSELMO SETTI**
Coordenador do Programa de Pós-Graduação em
Engenharia de Transportes

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

*If there is no self-progress,
you cannot be an instrument for world progress.*
BapDada

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela misericórdia, o amor, o conhecimento, a força espiritual e a motivação que tem me concedido nos últimos anos.

Ao Prof. Manoel Henrique Alba Sória, pela orientação, apoio, incentivo, amizade e confiança em mim depositada ao longo destes dois anos, sem os quais certamente este trabalho não se concretizaria.

Aos meus pais, Antonio Renê Faxina e Geny Aparecida Camilli Faxina, pelo apoio constante e incentivo.

Aos diretores, professores e alunos da Organização Brahma Kumaris, pelos ensinamentos sublimes que até hoje têm me trazido tantos benefícios pessoais, pela oportunidade que têm me dado de criar uma visão mais positiva da vida e de compartilhá-la com o mundo.

Ao Prof. Glauco Tulio Pessa Fabbri, do Departamento de Transportes – EESC/USP, pelas dicas valiosas dadas ao longo do desenvolvimento desta pesquisa e pelo apoio incansável nas atividades do laboratório.

Aos Prof. Glauco T. P. Fabbri e José Leomar Fernandes Jr., do Departamento de Transportes – EESC/USP, pela participação na banca do exame de qualificação.

À Prof. Sandra Oda, do Departamento de Engenharia Civil da Universidade Estadual de Maringá, PR, pela co-orientação, pelas dicas de grande valia na realização desta pesquisa, pelos materiais de pesquisa fornecidos e pela amizade e disponibilidade.

Às Engenheiras Químicas Beatrix de Villa Nery Martignoni, da Unidade de Negócios da Industrialização do Xisto (SIX) da Petrobrás de São Mateus do Sul, PR, pelas oportunidades criadas, pela orientação, pelo fornecimento de material informativo e dos resultados de alguns ensaios de laboratório, e Leni Figueiredo Mathias Leite, do Centro de Pesquisas da Petrobras (Cenpes) do Rio de Janeiro, RJ, pelas dicas valiosas que muito contribuíram para o perfeito andamento da pesquisa.

À Unidade de Negócios da Industrialização do Xisto da Petrobrás de São Mateus do Sul, PR, pelo fornecimento e envio dos asfaltos empregados nesta pesquisa.

À Prof. Marilda Serra Ávalos, do Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá, MT, pela amizade, pelo incentivo constante, pelas dicas sempre muito úteis e pela revisão dos textos do exame de qualificação e desta dissertação.

Ao Prof. Benedito Coutinho Neto, da Coordenação do Curso de Engenharia Civil da Universidade do Amazonas, Belém, PA, pelo apoio e amizade e, especialmente, pela revisão do texto desta dissertação.

Ao Antônio Carlos Gigante, técnico responsável pelo laboratório de Estradas do Departamento de Transportes da EESC/USP, pela cooperação, orientação e disponibilidade.

Aos técnicos do Laboratório de Estradas do Departamento de Transportes da EESC/USP, João D. Pereira Filho e Paulo Toyama, pelo auxílio e boa vontade.

A todos os funcionários do Departamento de Transportes da EESC/USP: às secretárias da pós-graduação, Heloísa H. B. P. Morgado Belo e Elizabeth R. Z. Ortega, às secretárias da graduação, Sueli A. L. Chinaglia, Antonia Magaly B. M. Cesar e Lillian P. Rossi, ao técnico em computação Antonio Carlos Mariano, ao Sr. Nelson F. França, Ângelo Leoni e Vicente R. Daló, pela amizade e bom humor.

Aos colegas do Departamento de Transportes da EESC/USP, em especial ao Carlos A. P. da Silva Jr., ao Marcus Seraphico e ao Cláudio Taira, pelo fornecimento de material de pesquisa; à Ana Paula Furlan, Jisela A. Santanna e Carlos A. P. da Silva Jr., pelo apoio no laboratório; ao Rogério S. B. Neto, pelas dicas, informações e materiais de pesquisa; à Adriana G. dos Santos, João G. M. de Souza, Andréa R. K. Kobayashi, Paulo C. L. Lemes, Fernanda C. Biroli, Guilherme F. Costa, Lillian T. de Gouveia, Antonio Carlos Dinato, Suelly Barroso, Célio Daroncho e Hélio M. F. Viana.

À Engenheira Roberta F. de Oliveira, pela amizade e auxílio na realização dos ensaios de laboratório.

Aos Prof. Antonio Nelson R. da Silva e Edson Martins de Aguiar, pela aprovação no programa de mestrado do Departamento de Transportes da EESC/USP.

Aos Professores do Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Engenharia da Unesp de Bauru, pelos tantos ensinamentos que tão precisamente embasaram meu bom desempenho na área de pós-graduação, em especial aos professores Newton C. P. Ferro e Eliane Viviani, pelas cartas de recomendação, e também ao professor Cláudio V. Ferreira.

Ao CNPq, pela concessão de bolsa de estudos durante os dois anos do meu mestrado.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	ix
LISTA DE TABELAS.....	xv
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS.....	xxiii
LISTA DE SÍMBOLOS.....	xxv
RESUMO.....	xxix
ABSTRACT.....	xxx

CAPÍTULO 1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. IDENTIFICAÇÃO DO PROBLEMA.....	2
1.2. OS PNEUS DESCARTADOS EM PAVIMENTAÇÃO ASFÁLTICA.....	2
1.3. MEIO AMBIENTE E LEGISLAÇÃO.....	4
1.4. PROGRAMA LABORATORIAL.....	5
1.5. OS OBJETIVOS DESTA PESQUISA.....	5
1.6. A ESTRUTURA DESTA DISSERTAÇÃO.....	6
 CAPÍTULO 2. MISTURAS ASFÁLTICAS: PROPRIEDADES MECÂNICAS.....	 9
2.1. INTRODUÇÃO.....	9
2.2. PRINCIPAIS PROPRIEDADES MECÂNICAS DAS MISTURAS ASFÁLTICAS.....	9
2.3. DEFORMAÇÕES PERMANENTES NAS TRILHAS DE RODA.....	11
2.3.1. Aspectos gerais sobre deformações permanentes.....	11
2.3.2. O mecanismo das deformações.....	13
2.3.3. Os fatores que influem nas deformações permanentes.....	14
2.3.4. Caracterização da deformação permanente pelo ensaio de fluência por compressão uniaxial estática.....	21
2.3.5. Valores limites para a deformação permanente.....	25
2.4. ALGUNS ENSAIOS PARA DETERMINAÇÃO DE PROPRIEDADES MECÂ- NICAS DAS MISTURAS ASFÁLTICAS.....	26
2.4.1. Introdução.....	26

2.4.2. Ensaio de resistência à tração por compressão diametral.....	27
2.4.2.1. Método de ensaio.....	27
2.4.2.2. A modelagem matemática do ensaio de tração indireta por compressão diametral.....	29
2.4.3. Ensaio de módulo de resiliência por compressão diametral dinâmica.....	33
2.4.3.1. Introdução.....	33
2.4.3.2. Método de ensaio.....	35
2.4.3.3. Estudos sobre o módulo de resiliência de misturas asfálticas.....	36
2.4.4. Ensaio de fluência por compressão uniaxial estática ("static creep test").....	40
2.4.4.1. Introdução.....	40
2.4.4.2. Histórico da utilização deste método de ensaio.....	41
2.4.4.3. O mecanismo das deformações no ensaio de fluência por compressão uniaxial.....	42
2.4.4.4. Critérios para a avaliação dos resultados do ensaio de fluência por compressão uniaxial estática.....	45
2.4.4.5. O ensaio de fluência por compressão uniaxial estática.....	50
2.4.4.6. Determinação do nível apropriado de tensão no ensaio de fluência por compressão uniaxial estática....	52
2.4.4.7. Méritos e limitações dos ensaios de fluência por compressão uniaxial estática.....	53

CAPÍTULO 3. BORRACHA DE PNEUS: USO EM PAVIMENTAÇÃO ASFÁLTICA.....

3.1. INTRODUÇÃO.....	55
3.2. ASPECTOS GERAIS DO USO DE BORRACHA DE PNEU EM PAVIMENTAÇÃO ASFÁLTICA.....	56
3.2.1. Histórico.....	56
3.2.2. Terminologia.....	57
3.2.3. Meio ambiente e legislação.....	60
3.2.4. Aplicações do ligante asfalto-borracha e custos relativos.....	61
3.2.5. Execução.....	65
3.3. O LIGANTE ASFALTO-BORRACHA.....	66
3.3.1. Introdução.....	66
3.3.2. Materiais utilizados na produção do ligante asfalto-borracha...	70

3.4. EXPERIÊNCIAS DO USO DE BORRACHA DE PNEU EM MISTURAS AS- FÁLTICAS.....	73
3.4.1. Parâmetros Marshall.....	73
3.4.2. Módulo de resiliência.....	74
3.4.3. Deformação permanente.....	75
3.4.4. Fadiga.....	76
3.4.5. Outras características mecânicas das misturas asfálticas modi- ficadas com borracha.....	77
3.4.6. Outros estudos.....	78
3.4.7. Extração de cimentos asfáltico.....	83
3.4. UMA BREVE DISCUSSÃO SOBRE A DOSAGEM DE CAUQ MODIFICADO COM BORRACHA DE PNEU.....	84
 CAPÍTULO 4. MATERIAIS, EQUIPAMENTOS E MÉTODOS EMPREGADOS_	89
4.1. INTRODUÇÃO.....	89
4.2. MATERIAIS EMPREGADOS NESTA PESQUISA.....	91
4.2.1. Materiais granulares.....	91
4.2.2. Cimentos asfálticos.....	95
4.2.3. Borracha.....	98
4.2.4. Óleo extensor de borracha.....	99
4.3. EQUIPAMENTOS UTILIZADOS.....	101
4.4. PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS.....	101
4.5. DOSAGEM DAS MISTURAS ASFÁLTICAS.....	103
4.5.1. Estimativa do teor ótimo de cimento asfáltico.....	103
4.5.2. Temperatura dos componentes da mistura e de misturação e compactação.....	105
4.5.3. Moldagem dos corpos-de-prova.....	105
4.6. DESCRIÇÃO DOS ENSAIOS REALIZADOS.....	106
4.6.1. Dosagem Marshall.....	106
4.6.2. Ensaio de resistência à tração por compressão diametral.....	108
4.6.3. Ensaio de módulo de resiliência por compressão diametral com carga repetida.....	108
4.6.4. Ensaio de fluência por compressão uniaxial estática.....	110
4.7. PROGRAMA COMPUTACIONAL PARA OPERAÇÃO DA PRENSA PNEU- MÁTICA E PARA AQUISIÇÃO AUTOMÁTICA DOS DADOS.....	112
4.8. ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS ENSAIOS.....	112

CAPÍTULO 5. RESULTADOS OBTIDOS E ANÁLISES.....	117
5.1. INTRODUÇÃO.....	117
5.2. DOSAGEM MARSHALL.....	118
5.3. ENSAIO DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL SIMPLES.....	128
5.4. ENSAIO DE MÓDULO DE RESILIÊNCIA.....	130
5.5. ENSAIO DE FLUÊNCIA POR COMPRESSÃO UNIAXIAL ESTÁTICA.....	136
5.5.1. Curvas de fluência.....	137
5.5.2. Parâmetros das curvas de fluência.....	144
5.5.3. Análise dos resultados com base nos critérios encontrados na literatura.....	168
5.6. REPETIBILIDADE DOS ENSAIOS REALIZADOS NESTA PESQUISA.....	169
CAPÍTULO 6. CONCLUSÕES.....	171
6.1. DOSAGEM MARSHALL.....	171
6.2. RESISTÊNCIA À TRAÇÃO.....	172
6.3. MÓDULO DE RESILIÊNCIA.....	172
6.4. FLUÊNCIA POR COMPRESSÃO UNIAXIAL ESTÁTICA.....	173
6.5. IDENTIFICAÇÃO DE “OUTLIERS”.....	174
6.6. REPETIBILIDADE DOS ENSAIOS DESTA PESQUISA.....	174
6.7. CONCLUSÕES FINAIS.....	175
6.8. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	177
ANEXOS.....	179
ANEXO A: Resultados dos ensaios de resistência à tração por compressão diame- tral simples, módulo de resiliência por compressão diametral com carga repetida e fluência por compressão uniaxial estática.....	181
ANEXO B: Resultados do teste de Grubbs para identificação de “outliers”.....	215
ANEXO C: Resultados de repetibilidade dos ensaios de dosagem Marshall, resis- tência à tração por compressão diametral simples, módulo de resiliên- cia por compressão diametral com carga repetida e fluência por com- pressão uniaxial estática.....	221
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	269
APÊNDICES.....	1
APÊNDICE A: Síntese da ISO 5725-2/94: <i>Precision of test methods – determina- tion of repeatability and reproducibility for a standard test method by inter- laboratory tests</i>	3
APÊNDICE B: Leis ambientais sobre pneus inservíveis.....	19

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1.	Ensaio de tração indireta em amostra cilíndrica. [Adaptado de PINTO & PREUSSLER (1980)].....	28
Figura 2.2.	Distribuição de tensões. [Adaptado de SCHMIDT (1972)].....	31
Figura 2.3.	Influência da intensidade da tensão sobre a taxa de fluência. [Adaptado de LITTLE et al. (1993)].....	42
Figura 2.4.	Estágios da fluência. [Adaptado de LITTLE et al. (1993)].....	43
Figura 3.1.	Terminologia.....	59
Figura 4.1.	Curvas granulométricas dos agregados minerais: faixa "C" DNER e distribuição granulométrica da mistura final (descartada).....	93
Figura 4.2.	Faixa granulométrica C do DER/SP (DER/SP, 1991) e curva granulométrica da mistura obtida.....	95
Figura 4.3.	Variação da viscosidade Saybolt-Furol com a temperatura.....	97
Figura 4.4.	Misturador empregado na preparação do asfalto-borracha.....	98
Figura 4.5.	Diagrama do procedimento experimental empregado.....	102
Figura 4.6.	Esquema ilustrativo do equipamento utilizado no ensaio de módulo de resiliência.....	109
Figura 4.7.	Esquema ilustrativo da prensa de adensamento utilizada no ensaio de fluência por compressão uniaxial estática.....	111
Figura 4.8.	Ilustração da tela do programa computacional que gerencia o ensaio de módulo de resiliência por compressão diametral dinâmica.....	113
Figura 5.1.	Gráficos do ensaio Marshall para a mistura M1 (CAP 40).....	120
Figura 5.2.	Gráficos do ensaio Marshall para a mistura M2 (CAP 40/12/10).....	121
Figura 5.3.	Gráficos do ensaio Marshall para a mistura M3 (CAP 40/20/15).....	122
Figura 5.4.	Comparativo da densidade aparente para as três misturas estudadas.	123
Figura 5.5.	Comparativo do volume de vazios para as três misturas estudadas....	124

Figura 5.6.	Comparativo da relação betume-vazios para as três misturas estudadas.	124
Figura 5.7.	Comparativo da estabilidade Marshall para as três misturas estudadas...	125
Figura 5.8.	Comparativo da fluência Marshall para as três misturas estudadas....	126
Figura 5.9.	Comparativo da capacidade de suporte Marshall para as três misturas estudadas.....	127
Figura 5.10.	Comparativo da resistência à tração das três misturas estudadas.....	129
Figura 5.11.	Comparativo da resistência à tração das três misturas estudadas.....	129
Figura 5.12.	Exemplo de cálculo do módulo de resiliência.....	130
Figura 5.13.	Média e desvio padrão dos resultados do módulo de resiliência das três misturas.....	132
Figura 5.14.	Valores de módulo de resiliência das três misturas e coeficientes de variação.....	132
Figura 5.15.	Média e desvio padrão dos valores do módulo de resiliência das três misturas (direção 2).....	133
Figura 5.16.	Valores de módulo de resiliência das três misturas e coeficientes de variação (direção 2).....	134
Figura 5.17.	Comparativo dos valores médios do módulo de resiliência das três misturas, nas direções d1 e d2, e desvio padrão.....	135
Figura 5.18.	Valores médios, das duas direções, do módulo de resiliência das três misturas e desvio padrão.....	135
Figura 5.19.	Curvas de fluência e de recuperação dos corpos-de-prova da mistura M1 (CAP 40), para tensão de 0,4 MPa.....	137
Figura 5.20.	Curvas de fluência e de recuperação dos corpos-de-prova da mistura M2 (CAP 40/12/10), para tensão de 0,4 MPa.....	138
Figura 5.21.	Curvas de fluência e de recuperação dos corpos-de-prova da mistura M3 (CAP 40/20/15), para tensão de 0,4 MPa.....	138
Figura 5.22.	Curvas de fluência e de recuperação dos corpos-de-prova da mistura M1 (CAP 40), para tensão de 0,7 MPa.....	139
Figura 5.23.	Curvas de fluência e de recuperação dos corpos-de-prova da mistura M2 (CAP 40/12/10), para tensão de 0,7 MPa.....	139
Figura 5.24.	Curvas de fluência e de recuperação dos corpos-de-prova da mistura M3 (CAP 40/20/15), para tensão de 0,7 MPa.....	140
Figura 5.25.	Curvas de fluência e de recuperação médias das três misturas estudadas, para tensão de 0,4 MPa.....	140

Figura 5.26. Curvas de fluência e de recuperação médias das três misturas estudadas, para tensão de 0,7 MPa.....	141
Figura 5.27. Média e desvio padrão da deformação total, no ensaio de fluência estática, das três misturas estudadas, para tensão axial de 0,4 MPa...	144
Figura 5.28. Valores de deformação total e coeficientes de variação, no ensaio de fluência estática, das três misturas estudadas, para tensão axial de 0,4 MPa.....	145
Figura 5.29. Média e desvio padrão da deformação recuperável, no ensaio de fluência estática, das três misturas estudadas, para tensão axial de 0,4 MPa.....	145
Figura 5.30. Valores da deformação recuperável e coeficientes de variação, no ensaio de fluência estática, das três misturas estudadas, para tensão axial de 0,4 MPa.....	146
Figura 5.31. Média e desvio padrão da deformação não recuperável, no ensaio de fluência estática, das três misturas estudadas, para tensão axial de 0,4 MPa.....	146
Figura 5.32. Valores da deformação não recuperável e coeficientes de variação, no ensaio de fluência estática, das três misturas estudadas, para tensão axial de 0,4 MPa.....	147
Figura 5.33. Média e desvio padrão da recuperação elástica, no ensaio de fluência estática, das três misturas estudadas, para tensão axial de 0,4 MPa.....	147
Figura 5.34. Valores da recuperação elástica e coeficientes de variação, no ensaio de fluência estática, das três misturas estudadas, para tensão axial de 0,4 MPa.....	148
Figura 5.35. Média e desvio padrão do módulo de fluência após 3 600 s, no ensaio de fluência estática, das três misturas estudadas, para tensão axial de 0,4 MPa.....	148
Figura 5.36. Valores do módulo de fluência após 3 600 s e coeficientes de variação, no ensaio de fluência estática, das três misturas estudadas, para tensão axial de 0,4 MPa.....	149
Figura 5.37. Média e desvio padrão do módulo de fluência após 4 500 s, no ensaio de fluência estática, das três misturas estudadas, para tensão axial de 0,4 MPa.....	149

Figura 5.38. Valores do módulo de fluência após 4 500 s e coeficientes de variação, no ensaio de fluência estática, das três misturas estudadas, para tensão axial de 0,4 MPa.....	150
Figura 5.39. Média e desvio padrão da inclinação do trecho reto, no ensaio de fluência estática, das três misturas estudadas, para tensão axial de 0,4 MPa.....	150
Figura 5.40. Valores da inclinação do trecho reto e coeficientes de variação, no ensaio de fluência estática, das três misturas estudadas, para tensão axial de 0,4 MPa.....	151
Figura 5.41. Média e desvio padrão da deformação total, no ensaio de fluência estática, das três misturas estudadas, para tensão axial de 0,7 MPa...	151
Figura 5.42. Valores de deformação total e coeficientes de variação, no ensaio de fluência estática, das três misturas estudadas, para tensão axial de 0,7 MPa.....	152
Figura 5.43. Média e desvio padrão da deformação recuperável, no ensaio de fluência estática, das três misturas estudadas, para tensão axial de 0,7 MPa.....	152
Figura 5.44. Valores da deformação recuperável e coeficientes de variação, no ensaio de fluência estática, das três misturas estudadas, para tensão axial de 0,7 MPa.....	153
Figura 5.45. Média e desvio padrão da deformação não recuperável, no ensaio de fluência estática, das três misturas estudadas, para tensão axial de 0,7 MPa.....	153
Figura 5.46. Valores da deformação não recuperável e coeficientes de variação, no ensaio de fluência estática, das três misturas estudadas, para tensão axial de 0,7 MPa.....	154
Figura 5.47. Média e desvio padrão da recuperação elástica, no ensaio de fluência estática, das três misturas estudadas, para tensão axial de 0,7 MPa.....	154
Figura 5.48. Valores da recuperação elástica e coeficientes de variação, no ensaio de fluência estática, das três misturas estudadas, para tensão axial de 0,7 MPa.....	155
Figura 5.49. Média e desvio padrão do módulo de fluência após 3 600 s, no ensaio de fluência estática, das três misturas estudadas, para tensão axial de 0,7 MPa.....	155

Figura 5.50. Valores do módulo de fluência após 3 600 s e coeficientes de variação, no ensaio de fluência estática, das três misturas estudadas, para tensão axial de 0,7 MPa.....	156
Figura 5.51. Média e desvio padrão do módulo de fluência após 4 500 s, no ensaio de fluência estática, das três misturas estudadas, para tensão axial de 0,7 MPa.....	156
Figura 5.52. Valores do módulo de fluência após 4 500 s e coeficientes de variação, no ensaio de fluência estática, das três misturas estudadas, para tensão axial de 0,7 MPa.....	157
Figura 5.53. Média e desvio padrão da inclinação do trecho reto, no ensaio de fluência estática, das três misturas estudadas, para tensão axial de 0,7 MPa.....	157
Figura 5.54. Valores da inclinação do trecho reto e coeficientes de variação, no ensaio de fluência estática, das três misturas estudadas, para tensão axial de 0,7 MPa.....	158
Figura 5.55. Comparativos entre médias e desvios padrões da deformação total, no ensaio de fluência estática, para as tensões axiais de 0,4 e 0,7 MPa.....	160
Figura 5.56. Comparativos entre médias e desvios padrões da deformação recuperável, no ensaio de fluência estática, para as tensões axiais de 0,4 e 0,7 MPa.....	161
Figura 5.57. Comparativos entre médias e desvios padrões da deformação não recuperável, no ensaio de fluência estática, para as tensões axiais de 0,4 e 0,7 MPa.....	161
Figura 5.58. Comparativos entre médias e desvios padrões da recuperação elástica, no ensaio de fluência estática, para as tensões axiais de 0,4 e 0,7 MPa.	162
Figura 5.59. Comparativos entre médias e desvios padrões do módulo de fluência aos 3 600 s, no ensaio de fluência estática, para as tensões axiais de 0,4 e 0,7 MPa.....	162
Figura 5.60. Comparativos entre médias e desvios padrões do módulo de fluência aos 4 500 s, no ensaio de fluência estática, para as tensões axiais de 0,4 e 0,7 MPa.....	163
Figura 5.61. Comparativos entre médias e desvios padrões da inclinação do trecho reto da curva de fluência, no ensaio de fluência estática, para as tensões axiais de 0,4 e 0,7 MPa.....	163

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1.	Fatores que influem nas deformações permanentes das misturas asfálticas. [Fonte: SOUZA et al. (1991) apud COELHO (1996)].....	16
Tabela 2.2.	Método subjetivo de identificação de misturas resistentes à deformação permanente. [Fonte: AL-ABDUL WAHHAB et al. (1995)].....	20
Tabela 2.3.	Classificação da deformação permanente por nível de severidade. [Fonte: MAHBOUB (1990)].....	25
Tabela 2.4.	Valores limites para a deformação permanente, no ensaio de fluência por compressão uniaxial estática. [Fonte: SOUZA et al (1991) apud COELHO (1996)].....	26
Tabela 2.5.	Influência da viscosidade do cimento asfáltico sobre os resultados dos ensaios. [Fonte: PINTO & PREUSSLER (1980)].....	36
Tabela 2.6.	Variação do módulo de resiliência em função do tipo de camada. [Fonte: PINTO & PREUSSLER (1980)].....	37
Tabela 2.7.	Resumo estatístico dos resultados de módulo de resiliência, para temperatura de 30°C. [Fonte: QUEIROZ & VISSER (1978)].....	38
Tabela 2.8.	Módulos de resiliência médios (MPa), para temperatura de 20 e 30°C. [Fonte: QUEIROZ & VISSER (1978)].....	38
Tabela 2.9.	Valores mínimos do módulo de fluência segundo KRONFUSS et al. (1984) apud LITTLE et al. (1993)].....	46
Tabela 2.10.	Critério para a avaliação de misturas asfálticas, com base na deformação permanente total e declividade do trecho uniforme da curva de fluência.[Fonte: LITTLE et al. (1993)].....	47
Tabela 2.11.	Critério para a avaliação de misturas asfálticas com base no módulo de fluência. [Fonte: LITTLE et al. (1993)].....	48
Tabela 3.1.	Especificação para diferentes tipos de ligantes asfalto-borracha proposta pela BAKER RUBBER Inc (1988) apud ODA (2000).....	69

Tabela 3.2.	Propriedades físicas de ligantes asfalto-borracha (ASTM, 1997 apud ODA, 2000).....	70
Tabela 3.3.	Módulos de rigidez à fluência médios obtidos no ensaio de fluência por compressão uniaxial estática. [Fonte: KRUTZ & STROUP-GARDINER et al. (1992)].....	79
Tabela 3.4.	Condições exigidas das misturas asfálticas para camada de rolamento. [Fonte: DNER-ES 313/97 (1997)].....	85
Tabela 3.5.	Recomendações quanto à dosagem de CAUQ modificado com borracha. [Fonte: EPPS (1994) e ROBERTS & LYTTON (1987)].....	87
Tabela 3.6.	Características e resultados de dosagens empregando ligante asfalto-borracha. [Fonte: AYRES & WITCZAK (1995)].....	88
Tabela 4.1.	Resultados dos ensaios de caracterização física dos agregados minerais fornecidos pelo SAOP da Prefeitura Municipal de Maringá, PR.	92
Tabela 4.2.	Limites da faixa granulométrica C do DNER (DNER-ES 313/97) e composições granulométricas dos agregados minerais e da mistura obtida (material fornecido pelo SAOP da Prefeitura Municipal de Maringá, PR).....	93
Tabela 4.3.	Resultados dos ensaios de caracterização física dos agregados minerais da pedreira Enderp de Ribeirão Preto, SP.....	94
Tabela 4.4.	Limites da faixa granulométrica “C” do DER/SP e composição granulométrica da mistura final.....	95
Tabela 4.5.	Resultados dos ensaios de caracterização física dos cimentos asfálticos. [Fonte: SIX-Petrobras].....	96
Tabela 4.6.	Especificação para o CAP 40 – classificação por viscosidade – Regulamento Técnico 01/92, Rev. 02, DNC. [Fonte: IBP (1994)].....	97
Tabela 4.7.	Composição granulométrica da borracha. [Fonte: SIX-Petrobras].....	99
Tabela 4.8.	Resultados dos ensaios de caracterização óleo extensor de borracha AR-5. [Fonte: SIX-Petrobras].....	100
Tabela 4.9.	Temperaturas dos componentes das misturas e de misturação e compactação.....	105
Tabela 4.10.	Condições exigidas das misturas asfálticas para camada de rolamento. [Fonte: DER (1991)].....	108
Tabela 4.11.	Valores de $G_{CRÍTICO}$. [Fonte: GRUBBS (1969)].....	115

Tabela 5.1.	Resultados do ensaio Marshall para a mistura convencional ou M1 (CAP 40).....	118
Tabela 5.2.	Tabela 5.2. Resultados do ensaio Marshall para a mistura M2 (CAP 40/12/10).....	119
Tabela 5.3.	Resultados do ensaio Marshall para a mistura M3 (CAP 40/20/15)..	119
Tabela 5.4.	Resultados do ensaio Marshall para as três misturas dosadas.....	119
Tabela 5.5.	Comparativo dos valores de estabilidade Marshall das três misturas dosadas.....	125
Tabela 5.6.	Comparativo da capacidade de suporte Marshall das três misturas dosadas.....	127
Tabela 5.7.	Dados estatísticos dos resultados de resistência à tração e alguns parâmetros de caracterização das misturas.....	128
Tabela 5.8.	Dados estatísticos dos resultados de módulo de resiliência e alguns parâmetros de caracterização das misturas.....	131
Tabela 5.9.	Dados estatísticos dos resultados de módulo de resiliência, na direção 2	133
Tabela 5.10.	Dados estatísticos dos resultados de módulo de resiliência, representando a média dos resultados das duas direções.....	134
Tabela 5.11.	Dados estatísticos dos parâmetros da curva de fluência, para tensão de 0,4 MPa.....	142
Tabela 5.12.	Resultados médios obtidos no ensaio de fluência por compressão uniaxial estática, para tensão de 0,7 MPa.....	143
Tabela 5.13.	Ocorrência de “outliers” nos resultados dos ensaios de fluência estática.	144
Tabela 5.14.	Resumo do desempenho das três misturas com base nos parâmetros da curva de fluência, para tensão de 0,4 MPa.....	159
Tabela 5.15.	Resumo do desempenho das três misturas com base nos parâmetros da curva de fluência, para tensão de 0,7 MPa.....	159
Tabela 5.16.	Comparação dos parâmetros obtidos nos ensaios de fluência estática, com tensão de 0,4 MPa.....	164
Tabela 5.17.	Comparação dos parâmetros obtidos nos ensaios de fluência estática, com tensão de 0,7 MPa.....	166

Tabela 5.18. Ensaio Marshall - Probabilidades de ocorrência de valores menores ou iguais ao valor de repetibilidade apropriado, de acordo com os modelos da ISO 5725/94, com nível de confiança de 95%.....	169
Tabela 5.19. Ensaio de resistência à tração e de módulo de resiliência - Probabilidades de ocorrência de valores menores ou iguais ao valor de repetibilidade apropriado, de acordo com os modelos da ISO 5725/94, com nível de confiança de 95%.....	169
Tabela 5.20 Ensaio de fluência estática com tensão de 0,4 MPa - Probabilidades de ocorrência de valores menores ou iguais ao valor de repetibilidade apropriado, de acordo com os modelos da ISO 5725/94, com nível de confiança de 95%.....	170
Tabela 5.21. Ensaio de fluência estática com tensão de 0,7 MPa - Probabilidades de ocorrência de valores menores ou iguais ao valor de repetibilidade apropriado, de acordo com os modelos da ISO 5725/94, com nível de confiança de 95%.....	170
Tabela A1. Resultados dos ensaios de resistência à tração por compressão diametral simples.....	183
Tabela A2. Características dos corpos-de-prova usados no ensaio de módulo de resiliência por compressão diametral dinâmica.....	184
Tabela A3. Resultados dos ensaios de módulo de resiliência por compressão diametral dinâmica – mistura M1, direção d ₁	185
Tabela A4. Resultados dos ensaios de módulo de resiliência por compressão diametral dinâmica – mistura M1, direção d ₂	186
Tabela A5. Resultados dos ensaios de módulo de resiliência por compressão diametral dinâmica – mistura M2, direção d ₁	187
Tabela A6. Resultados dos ensaios de módulo de resiliência por compressão diametral dinâmica – mistura M2, direção d ₂	188
Tabela A7. Resultados dos ensaios de módulo de resiliência por compressão diametral dinâmica – mistura M3, direção d ₁	189
Tabela A8. Resultados dos ensaios de módulo de resiliência por compressão diametral dinâmica – mistura M3, direção d ₂	190
Tabela A9. Características dos corpos-de-prova usados no ensaio de fluência por compressão uniaxial estática.....	191

Tabela A10. Resultados do ensaio de fluência estática do corpo-de-prova CP7 – mistura M1.....	193
Tabela A11. Resultados do ensaio de fluência estática do corpo-de-prova CP8 – mistura M1.....	194
Tabela A12. Resultados do ensaio de fluência estática do corpo-de-prova CP9 – mistura M1.....	195
Tabela A13. Resultados do ensaio de fluência estática do corpo-de-prova CP10 – mistura M1.....	196
Tabela A14. Resultados do ensaio de fluência estática do corpo-de-prova CP7a – mistura M2.....	197
Tabela A15. Resultados do ensaio de fluência estática do corpo-de-prova CP8a – mistura M2.....	198
Tabela A16. Resultados do ensaio de fluência estática do corpo-de-prova CP9a – mistura M2.....	199
Tabela A17. Resultados do ensaio de fluência estática do corpo-de-prova CP10a – mistura M2.....	200
Tabela A18. Resultados do ensaio de fluência estática do corpo-de-prova CP9b – mistura M3.....	201
Tabela A19. Resultados do ensaio de fluência estática do corpo-de-prova CP10b – mistura M3.....	202
Tabela A20. Resultados do ensaio de fluência estática do corpo-de-prova CP11b – mistura M3.....	203
Tabela A21. Resultados do ensaio de fluência estática do corpo-de-prova CP4 – mistura M1.....	204
Tabela A22. Resultados do ensaio de fluência estática do corpo-de-prova CP5 – mistura M1.....	205
Tabela A23. Resultados do ensaio de fluência estática do corpo-de-prova CP6 – mistura M1.....	206
Tabela A24. Resultados do ensaio de fluência estática do corpo-de-prova CP12 – mistura M1.....	207
Tabela A25. Resultados do ensaio de fluência estática do corpo-de-prova CP4a – mistura M2.....	208

Tabela A26. Resultados do ensaio de fluência estática do corpo-de-prova CP5a – mistura M2.....	209
Tabela A27. Resultados do ensaio de fluência estática do corpo-de-prova CP6a – mistura M2.....	210
Tabela A28. Resultados do ensaio de fluência estática do corpo-de-prova CP11a – mistura M2.....	211
Tabela A29. Resultados do ensaio de fluência estática do corpo-de-prova CP6b – mistura M3.....	212
Tabela A30. Resultados do ensaio de fluência estática do corpo-de-prova CP7b – mistura M3.....	213
Tabela A31. Resultados do ensaio de fluência estática do corpo-de-prova CP8b – mistura M3.....	214
Tabela B1. Dosagem Marshall da mistura M1.....	217
Tabela B2. Identificação de “outliers” – mistura M1.....	218
Tabela B3. Dosagem Marshall da mistura M2.....	219
Tabela B4. Identificação de “outliers” – mistura M2.....	220
Tabela B5. Dosagem Marshall da mistura M3.....	221
Tabela B6. Identificação de “outliers” – mistura M3.....	222
Tabela B7. Identificação de “outliers” – ensaio de resistência à tração (resulta- dos em MPa).....	223
Tabela B8. Identificação de “outliers” – valores médios de módulo de resiliên- cia na direção 1.....	223
Tabela B9. Identificação de “outliers” – valores médios de módulo de resiliên- cia na direção 2.....	224
Tabela B10. Identificação de “outliers” – valores médios de módulo de resiliên- cia entre as direções 1 e 2.....	224
Tabela B11. Identificação de “outliers” – ensaio de fluência para tensão de 0,4 MPa.	225
Tabela B12. Identificação de “outliers” – ensaio de fluência para tensão de 0,7 MPa.	227
Tabela C1. Variação dos resultados dos parâmetros Marshall para a mistura M1..	233
Tabela C2. Variação dos resultados dos parâmetros Marshall para a mistura M2..	234
Tabela C3. Variação dos resultados dos parâmetros Marshall para a mistura M3..	235

Tabela C4.	Equações de repetibilidade em função da média "m" dos valores dos parâmetros de dosagem Marshall, para os três modelos recomendados pela ISO 5725-2/94, para nível de confiança de 95%.....	236
Tabela C5.	Equações da repetibilidade "r" em função da média "m" dos resultados das dosagens Marshall, para os três modelos sugeridos pela ISO 5725-2/94, com nível de confiança de 95%.....	241
Tabela C6.	Valores de repetibilidade "r" para as dosagens Marshall, de acordo com os modelos da ISO 5725-2/94, para nível de confiança de 95%.	241
Tabela C7.	Determinação das diferenças entre resultados dos ensaios e número de diferenças maiores que o valor de repetibilidade – mistura M1.....	242
Tabela C8.	Determinação das diferenças entre resultados dos ensaios e número de diferenças maiores que o valor de repetibilidade – mistura M2.....	243
Tabela C9.	Determinação das diferenças entre resultados dos ensaios e número de diferenças maiores que o valor de repetibilidade – mistura M3.....	244
Tabela C10.	Variação dos resultados de resistência à tração para as três misturas.	245
Tabela C11.	Equações de repetibilidade em função da média "m" dos valores de resistência à tração das três misturas, para os três modelos recomendados pela ISO 5725-2/94, para nível de confiança de 95%.....	245
Tabela C12.	Variação dos resultados de módulo de resiliência (MPa) para as três misturas.....	246
Tabela C13.	Equações de repetibilidade em função da média "m" dos valores de módulo de resiliência das três misturas, para os três modelos recomendados pela ISO 5725-2/94, para nível de confiança de 95%.....	247
Tabela C14.	Equações da repetibilidade "r" em função da média "m" dos resultados de resistência à tração e módulo de resiliência para os três modelos sugeridos pela ISO 5725-2/94, com nível de confiança de 95%.	248
Tabela C15.	Valores de repetibilidade "r" para os resultados dos ensaios de resistência à tração e módulo de resiliência das três misturas, de acordo com os modelos da ISO 5725-2/94, para nível de confiança de 95%.	249
Tabela C16.	Determinação das diferenças entre resultados dos ensaios e número de diferenças maior que o valor de repetibilidade.....	249
Tabela C17.	Variação dos resultados dos ensaios de fluência por compressão uniaxial estática, para tensão de 0,4 MPa.....	250

Tabela C18. Equações de repetibilidade em função da média "m" dos resultados do ensaio de fluência estática das três misturas, tensão de 0,4 MPa, para os três modelos recomendados pela ISO 5725-2/94, para nível de confiança de 95%.....	253
Tabela C19. Equações da repetibilidade "r" em função da média "m" dos resultados do ensaio de fluência estática das três misturas, tensão de 0,4 MPa, para os três modelos sugeridos pela ISO 5725-2/94, com nível de confiança de 95%.....	256
Tabela C20. Valores de repetibilidade "r" para os resultados dos ensaios de fluência estática para as três misturas, tensão de 0,4 MPa, de acordo com os modelos da ISO 5725-2/94, para nível de confiança de 95%.....	257
Tabela C21. Determinação das diferenças entre resultados dos ensaios de fluência estática, tensão de 0,4 MPa, e número de diferenças maior que o valor de repetibilidade, de acordo com os modelos da ISO 5725-2/94, para nível de confiança de 95%.....	257
Tabela C22. Variação dos resultados dos ensaios de fluência por compressão uniaxial estática, para tensão de 0,7 MPa.....	259
Tabela C23. Equações de repetibilidade em função da média "m" dos resultados do ensaio de fluência estática das três misturas, tensão de 0,7 MPa, para os três modelos recomendados pela ISO 5725-2/94, para nível de confiança de 95%.....	262
Tabela C24. Equações da repetibilidade "r" em função da média "m" dos resultados do ensaio de fluência estática das três misturas, tensão de 0,7 MPa, para os três modelos sugeridos pela ISO 5725-2/94, com nível de confiança de 95%.....	265
Tabela C25. Valores de repetibilidade "r" para os resultados dos ensaios de fluência estática para as três misturas, tensão de 0,7 MPa, de acordo com os modelos da ISO 5725-2/94, para nível de confiança de 95%.....	266
Tabela C26. Determinação das diferenças entre resultados dos ensaios de fluência estática, tensão de 0,7 MPa, e número de diferenças maior que o valor de repetibilidade, de acordo com os modelos da ISO 5725-2/94, para nível de confiança de 95%.....	266
Tabela 1. Fatores de multiplicação para níveis de probabilidade diferentes de 95%. [Fonte: ISO 5725/1986].....	17

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AAMAS	Asphalt Aggregate Mixture Analysis System
AAPT	Association of Asphalt Paving Technologists
AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANIP	Associação Nacional das Indústrias de Pneumáticos
AR-5	classificação do agente rejuvenescedor (segundo ASTM D4552/86)
ASTM	American Society for Testing and Materials
CAP	cimento asfáltico de petróleo
CAUQ	concreto asfáltico usinado a quente (CBUQ)
CBR	Índice de Suporte California (California Bearing Ratio)
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
CRM	crumb rubber modifier
DECEX	Departamento de Operações de Comércio Exterior
DER-SP	Departamento de Estradas de Rodagem do Estado de São Paulo
DNER-ME	Método de ensaio do Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
EESC-USP	Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo
EM	estabilidade Marshall
EVA	ethylene vinyl acetate (polímero)
FAA	Federal Aviation Administration
FHWA	Federal Highway Administration
FM	fluência Marshall

IBAMA	Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis
IST	índice de suscetibilidade térmica de um cimento asfáltico
ISTEA	Intermodal Surface Transportation Efficiency Act
LCPC	Laboratoire Central des Ponts et Chaussées
LTPP	Long Term Pavement Performance
LTRC	Louisiana Transportation Research Center
LVDT	linear variable differential transformer
NCHRP	National Cooperative Highway Research Program
NMR	nuclear magnetic resonance
PA	ponto de amolecimento de um cimento asfáltico
PEN	penetração de um cimento asfáltico
RBV	relação betume-vazios
RTFOT	Rolling Thin Film Oven Test
SAM	stress absorbing membrane
SAMI	stress absorbing membrane interlayer
SAOP	Serviço Autônomo de Obras de Pavimentação (Prefeitura Municipal de Maringá, PR)
SBR	styrene-butadiene-rubber (polímero)
SBS	styrene-butadiene-styrene (polímero)
SHRP	Strategic Highway Research Program
SIX	Superintendência da Industrialização do Xisto – Petrobras
TEC	Tarifa Externa Comum
TFOT	Thin Film Oven Test
TRB	Transportation Research Board
TRR	Transportation Research Record
UEM	Universidade Estadual de Maringá
VAM	vazios do agregado mineral
VGC	viscosity-gravity constant

LISTA DE SÍMBOLOS

Δ	deformação total, deformação elástica ou resiliente
Δh	variação da altura do corpo-de-prova Marshall
Δ_i	deformação resiliente, para cálculo do módulo de resiliência
δ_{am}	densidade real do agregado mineral
ε_{qu}	deformação
ε_{π}	deformação elástica total
ε_t	deformação recuperável
ε_{vp}	deformação viscosa ou viscoplástica
ε_x	deformação na direção x
μ	coeficiente de Poisson, valor de referência em um ensaio de laboratório
σ	tensão normal
σ_L^2	variância interlaboratorial (inclui a variabilidade entre operadores e entre equipamentos)
σ_r	desvio padrão da repetibilidade
σ_R	resistência à tração, desvio padrão da reprodutibilidade
σ_r^2	variância de repetibilidade
σ_t	tensão de tração
σ_w^2	variância intralaboratorial
σ_x	tensão de compressão (direção x)
σ_y	tensão de tração (direção y)
σ_z	tensão de tração na direção z
a	coeficiente, intercepto na relação $r = a + bm$
b	coeficiente, declividade do trecho reto da curva de fluência, declividade na relação $r = bm$ e $r = a + bm$

B	desvio de um laboratório com relação à média geral
c	intercepto na relação $\log r = c + d \log m$
cv	coeficiente de variação
d	declividade na relação $\log r = c + d \log m$
D	diâmetro do corpo-de-prova Marshall
D_a	densidade aparente do corpo-de-prova Marshall
d_{af}	densidade real do agregado miúdo
d_{ag}	densidade real do agregado graúdo
d_b	densidade real do cimento asfáltico
d_f	densidade real do filer
D_h	variação na altura do corpo-de-prova Marshall no ensaio de fluência estática
d_i	diâmetro do corpo-de-prova Marshall, medido em três posições distintas
d_m	diâmetro médio do corpo-de-prova Marshall
dp	desvio padrão
D_t	densidade teórica do corpo-de-prova Marshall
e	erro devido ao acaso em um ensaio de laboratório
E	módulo de elasticidade
F	carga de ruptura no ensaio de tração indireta
f	fator crítico
G	estatística de Grubbs
$G_{CRÍTICO}$	valor crítico da estatística de Grubbs
G_{MAIOR}	valor crítico superior da estatística de Grubbs
G_{MENOR}	valor crítico inferior da estatística de Grubbs
H	altura do corpo-de-prova Marshall; profundidade
h_0	altura inicial do corpo-de-prova Marshall, obtida na direção do carregamento
H_0	hipótese nula, altura inicial do corpo-de-prova Marshall no ensaio de fluência estática
H_a	hipótese alternativa
h_i	altura do corpo-de-prova Marshall, medida em três posições distintas
h_m	altura média do corpo-de-prova Marshall
Lat	latitude
m	módulo de riqueza, média
M1	mistura de referência (CAP 40 puro)
M2	mistura empregando CAP 40 + 12% de borracha + 10% de óleo de xisto
M3	mistura empregando CAP 40 + 20% de borracha + 15% de óleo de xisto

$M_{\text{ÁGUA}}$	massa imersa do corpo-de-prova Marshall
M_{AR}	massa ao ar do corpo-de-prova Marshall
M_F	módulo de fluência
M_R	módulo de resiliência
n	número de determinações (número de corpos-de-prova ensaiados para o mesmo tratamento), número de resultados de ensaio obtidos em um laboratório para um nível da propriedade ensaiada
N	número de diferenças possíveis entre resultados de ensaios
p	número de laboratórios integrantes do experimento interlaboratorial
P	probabilidade de ocorrência de diferenças menores ou iguais a r ou R
P_{CA}	teor de cimento asfáltico, em relação à mistura, em massa
q	número de níveis de uma propriedade de um material ensaiado
r	correlação, valor de repetibilidade
R	valor de reprodutibilidade
s	desvio padrão
S	superfície específica do agregado mineral
s_r	desvio padrão da amostra para verificação da repetibilidade
s_R	desvio padrão da amostra para verificação da reprodutibilidade
T	temperatura
t	tempo, altura do disco ou cilindro
T'_{CA}	teor de cimento asfáltico corrigido
T_{AR}	temperatura do ar
T_{CA}	teor de cimento asfáltico, em relação à massa do agregado mineral
T_i	somatório de algumas expressões
V_b	vazios ocupados pelo cimento asfáltico
V_v	volume de vazios
W	fator considerado em uma regressão ponderada
x	distância medida no eixo das abscissas
y	distância medida no eixo das ordenadas, resultado de um ensaio
y_i	valores máximo e mínimo dentro do conjunto de resultados de um mesmo tratamento
$Y_{\text{MÁXIMO}}$	valor máximo dentro do conjunto de resultados de um mesmo tratamento
$Y_{\text{MÍNIMO}}$	valor mínimo dentro do conjunto de resultados de um mesmo tratamento
	média dos resultados de um mesmo tratamento

RESUMO

Pesquisas sobre aplicação de borracha de pneus descartados em pavimentação asfáltica vêm sendo desenvolvidas desde a década de 1960, especialmente nos Estados Unidos, e desde o início da década de 1990, no Brasil, como alternativa para diminuição dos problemas ambientais gerados por estes resíduos sólidos. Esta pesquisa tem por objetivo avaliar o desempenho de três misturas asfálticas do tipo concreto asfáltico usinado a quente: duas empregando teores diferentes de borracha moída e óleo de xisto (CAP 40 + 12% de borracha + 10% óleo de xisto e CAP 40 + 20% de borracha + 15% de óleo de xisto) e uma convencional. Este estudo faz parte de um programa de pesquisa coordenado pela Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo (EESC-USP), Universidade Estadual de Maringá (UEM) e Petrobras, envolvendo a execução de misturas com borracha e óleo de xisto em trechos experimentais. Foram realizadas dosagens Marshall e ensaios de resistência à tração, módulo de resiliência e fluência por compressão uniaxial estática. Os corpos-de-prova empregados nos ensaios foram moldados no teor ótimo de cimento asfáltico referente a cada uma das misturas. Constatou-se a viabilidade técnica da adição de óleo extensor para a incorporação de borracha de pneus descartados em concreto asfáltico, permitindo a obtenção de resultados satisfatórios quanto aos projetos de dosagem das mistura pelo método Marshall. Com base nos resultados dos ensaios realizados, acredita-se ser viável a execução de trechos experimentais empregando as duas misturas modificadas.

Palavras-chave: ligante asfalto-borracha, processo úmido, concreto asfáltico usinado a quente, ensaios de laboratório.

ABSTRACT

Researches on the application of discarded tires in asphaltic pavements has been developed since 1960, mainly in the United States, and since the beginning of the 90's in Brazil, as an alternative to the reduction of environmental problems created by this kind of solid residues. The purpose of this research is to evaluate the performance of three hot mix asphalt concrete: two using different crumb rubber and shale oil contents (CAP 40 + 12% rubber + 10% shale oil and CAP 40 + 20% rubber + 15% shale oil) and a conventional hot mix asphalt concrete. The research is part of a major program coordinated by the Universidade de São Paulo (EESC-USP), Universidade Estadual de Maringá and Petrobras, comprehending the execution of asphaltic mixtures using tire rubber and shale oil in experimental road segments. The tests performed are: Marshall test, indirect tension, resilient modulus and static creep. The samples tested were compacted in the optimum binder content of each mixture. Good results obtained in tests confirmed the technical viability of using the shale oil as extender in crumb rubber asphalt hot mixtures. The results lead to the conclusion that experimental road sections or segments may be constructed with both tested rubber-oil modified asphalt mixtures.

Keywords: asphalt-rubber binder, wet process, hot mix asphalt concrete, laboratorial tests.

1. INTRODUÇÃO

As propriedades dos cimentos asfálticos e das misturas asfálticas são objetos de muitos estudos e experiências ao longo das últimas décadas, especialmente a partir do momento em que o crescimento econômico das nações obrigou-as a investir pesadamente em obras de infra-estrutura viária. O cimento asfáltico de petróleo apresentou-se, desde as primeiras experiências, como um agente cimentante de eficiência satisfatória quando associado a agregados minerais, compondo misturas caracterizadas por apresentarem durabilidade, flexibilidade, adequada capacidade de resistir às ações oriundas do tráfego e das intempéries e proporcionar boas condições de atrito superficial.

Ao longo do tempo, o avanço tecnológico proporcionou, e ainda proporciona, o aperfeiçoamento destas propriedades das misturas e individualmente dos materiais que as compõem, especialmente dos cimentos asfálticos, acompanhado do aperfeiçoamento das técnicas executivas existentes e desenvolvimento de outras. Atualmente, difundiu-se o emprego, na pavimentação, dos asfaltos reologicamente modificados, que apresentam propriedades físicas, mecânicas e químicas melhoradas em relação aos cimentos asfálticos convencionais, proporcionando, de forma geral, aumento significativo do desempenho das misturas asfálticas. São adicionados aos cimentos asfálticos produtos como agentes melhoradores de adesividade, agentes rejuvenescedores, polímeros (SBS, SBR, EVA e outros) e também borracha de pneu.]

O aproveitamento de pneus descartados em pavimentação asfáltica associa ganhos em termos tecnológicos e ambientais. A incorporação de borracha às misturas asfálticas pode melhorar suas propriedades mecânicas, contribuindo, desta forma, para a melhoria do desempenho dos pavimentos. Proporciona também a diminuição dos passivos ambientais de pneus inutilizados, o que conduz à redução dos problemas ambientais gerados pela disposição inadequada destes elementos no meio ambiente.

1.1. Identificação do problema

Anualmente, centenas de milhões de pneus são descartados no mundo todo. O passivo ambiental contém bilhões de unidades dispostas inadequadamente, gerando graves problemas ambientais. Nos Estados Unidos, aproximadamente 285 milhões de pneus são descartados anualmente e o passivo ambiental está entre 2 e 3 bilhões de unidades (BROWN et al., 1997; ROBERTS et al., 1998). Destes 285 milhões, 55 milhões são recauchutados e 42 milhões são queimados para produção de energia e empregados em misturas asfálticas. Os 188 milhões restantes são dispostos no meio ambiente (ROBERTS et al., 1998). No Brasil, o passivo ambiental chega a 900 milhões de unidades (ROCHA FILHO, 2001).

Quando abandonados em locais inadequados, os pneus descartados servem para procriação de mosquitos e outros vetores de doenças e representam risco constante de incêndio, que contamina o ar com fumaça altamente tóxica (dióxido de enxofre) e também o solo e a água. Quando lançados em aterros sanitários, diminuem a vida útil destes, pois dificultam a sua compactação. A trituração, que resolveria o problema da compactação, é um processo com custos elevados.

1.2. Os pneus descartados em pavimentação asfáltica

A reciclagem é uma alternativa valiosa para a diminuição dos problemas ambientais gerados pelos pneus descartados. O emprego deste material em pavimentação é promissor, conforme pode ser constatado por experiências realizadas em vários países ao longo das últimas décadas, especialmente nos Estados Unidos.

O uso de pneus descartados em pavimentação não é um conceito novo. Eles têm sido usados, há décadas, no controle de erosão e na estabilização de taludes de rodovias. As primeiras experiências da incorporação da borracha moída às misturas asfálticas foram feitas pelos Estados Unidos, na década de 1960, e desde então, inúmeros estudos foram desenvolvidos naquele país e em outras partes do mundo. No Brasil, este tema começou a ser pesquisado por algumas universidades e centros de pesquisa no início da década de 1990.

Dentre as principais propriedades das misturas asfálticas modificadas com borracha estudadas nos Estados Unidos estão: parâmetros da dosagem Marshall (estabilidade e fluência Marshall, volume de vazios, vazios do agregado mineral e densidade), módulo de resiliência, deformação permanente, fadiga, resistência à tração, suscetibilidade à ação da água, formação de trincas de origem térmica, abrasão e atrito superficial.

É importante destacar que, de forma geral, as propriedades das misturas asfálticas corriqueiramente avaliadas são muito sensíveis a fatores como: tipo, dimensão máxima e granulometria dos agregados minerais e da borracha de pneu, tipo e teor de cimento asfáltico, temperatura de confecção das misturas, processo de compactação e outros fatores intervenientes. Sob esta ótica, algumas das conclusões de estudos sobre a incorporação de borracha às misturas asfálticas são válidas apenas para as condições particulares nas quais foram ensaiadas, embora, em muitos casos, verifica-se melhoria das propriedades mecânicas das misturas que contém borracha.

O módulo de resiliência diminui quando é adicionada borracha ao concreto asfáltico, segundo os estudos de AYRES & WITCZAK (1995), EPPS (1994) e HANSON et al. (1994). Os valores de módulo de resiliência podem aumentar ou diminuir com a adição de borracha, dependendo especialmente da temperatura de ensaio. A suscetibilidade à ação da água diminui quando borracha é adicionada às misturas asfálticas, segundo HANSON et al. (1994).

A vida de fadiga aumenta, quando borracha é adicionada ao concreto asfáltico, segundo EPPS (1994). A resistência à tração das misturas modificadas com borracha é similar à das convencionais, segundo BROWN et al. (1997) e HANSON et al. (1994) e pode aumentar ou diminuir, segundo EPPS (1994).

A resistência ao desgaste superficial dos revestimentos asfálticos modificados com borracha pode aumentar ou diminuir, conforme EPPS (1994). Já a resistência à formação de trincas de origem térmica normalmente é maior em misturas modificadas com borracha, segundo EPPS (1994) e CHOUBANE et al. (1999).

A resistência à deformação permanente das misturas modificadas com borracha é similar à das convencionais, segundo EPPS (1994) e BROWN et al. (1997). KRUTZ & STROUP-GARDINER (1992) e HANSON et al. (1994) verificaram que a resistência à deformação permanente aumenta com a adição de borracha, ao passo que MAUPIN (1992) constatou o contrário. STEPHENS (1982) verificou que a resistência à deformação permanente de misturas modificadas com borracha diminui quando é avaliada por meio do ensaio de fluência por compressão uniaxial com carga estática e que

esta mesma propriedade aumenta quando é avaliada por meio do ensaio de fluência por compressão uniaxial com carga repetida.

Quanto aos parâmetros da dosagem Marshall, alguns estudos dizem que a estabilidade Marshall diminui com a adição de borracha ao concreto asfáltico (EPPS, 1994 e HANSON et al., 1994), enquanto que para ROBERTS & LYTTON (1987) ocorre aumento da estabilidade Marshall. Para BROWN et al. (1997), as misturas modificadas com borracha e as convencionais apresentam valores de estabilidade similares. A fluência Marshall aumenta quando é adicionada borracha à mistura, segundo EPPS (1994) e HANSON et al. (1994), porém apresenta valores similares para ambos os tipos de mistura segundo BROWN et al. (1997). O volume de vazios e os vazios do agregado mineral costumam aumentar quando há adição de borracha, segundo EPPS (1994). Para este mesmo autor, a densidade de ambos os tipos de mistura é similar.

A incorporação de borracha de pneu às misturas asfálticas pode ser efetuada por meio do processo seco, no qual a borracha é triturada e adicionada à mistura como agregado, ou pelo processo úmido, no qual a borracha é moída e incorporada ao cimento asfáltico, antes da mistura com os agregados. Para ambos os processos, adaptações nos procedimentos de preparação em usina, lançamento e compactação são necessárias a fim de se obter camadas asfálticas com boas características mecânicas.

Um dos elementos que podem ser empregados na produção do asfalto-borracha é o chamado “óleo extensor de borracha”, cuja função é facilitar a incorporação da borracha moída ao cimento asfáltico, resultando um ligante asfalto-borracha de melhor qualidade. A incorporação da borracha envolve o consumo dos óleos aromáticos presentes no cimento asfáltico, reduzindo a porcentagem destes e provocando aumento da viscosidade do produto final. A adição do óleo extensor de borracha pode corrigir a composição química do cimento asfáltico, levando a viscosidade do ligante asfalto-borracha aos níveis aceitáveis para o uso em serviços de pavimentação. Pode ser adicionado em proporções que variam de 5 a 20% do percentual de cimento asfáltico, dependendo de fatores como a viscosidade do cimento asfáltico e a porcentagem de borracha.

1.3. Meio ambiente e legislação

Nos Estados Unidos, a partir do início da década de 1990, aumentou a preocupação dos órgãos ambientais e governamentais com a destinação dos pneus

descartados. Em 1991, a Lei sobre a Eficiência do Transporte Intermodal de Superfície (“ISTEA – Intermodal Surface Transportation Efficiency Act”), estabeleceu o uso mínimo de borracha de pneu a ser empregado, pelas agências rodoviárias daquele país, em pavimentação asfáltica, como uma tentativa de diminuir o problema ambiental provocado pelos pneus descartados. A partir de então, os departamentos de transporte norte-americanos intensificaram os estudos sobre o desempenho das misturas asfálticas modificadas com borracha, inclusive daquelas que empregam o ligante asfalto-borracha (AYRES & WITCZAK, 1995).

No Brasil, ainda não há uma lei semelhante que obrigue a utilização de uma porcentagem mínima de pneus descartados em obras de pavimentação. Mas alguns avanços já ocorreram, como por exemplo a Resolução nº 258 do CONAMA (Conselho Nacional do Meio Ambiente), aprovada em 26 de agosto de 1999, que estabelece responsabilidade ao produtor de pneumáticos pelo destino final dos mesmos. A partir de 2002, produtores e importadores de pneus serão forçados a coletá-los e colocá-los em locais ambientalmente adequados e a partir de 2005 começará a diminuição do passivo ambiental. Tudo isto motiva o estudo de alternativas para o uso deste material descartado, inclusive na área de pavimentação.

1.4. Programa laboratorial

Para avaliar o desempenho de misturas asfálticas empregando ligante asfalto-borracha foram escolhidos os ensaios de tração indireta por compressão diametral, módulo de resiliência e fluência por compressão uniaxial estática (“static creep test”). Tais ensaios foram selecionados por serem de fácil execução, exigindo equipamentos que são disponíveis em alguns laboratórios de pavimentação do Brasil e também por fornecem resultados bastante consistentes.

1.5. Os objetivos desta pesquisa

Os objetivos desta pesquisa são:

- empreender uma revisão bibliográfica abordando os principais aspectos dos ensaios de tração indireta por compressão diametral, módulo de resiliência por compressão diametral com carga repetida e fluência por compressão uniaxial estática, além de rever alguns dos principais estudos sobre deformação permanente e da aplicação de borracha de pneus em pavimentação;
- ✎ avaliar as propriedades mecânicas de três misturas asfálticas, sendo uma mistura de referência (CAP 40 puro) e outras duas contendo percentuais diferentes de borracha moída e óleo extensor (CAP 40 + 12% de borracha + 10% óleo extensor de borracha e CAP 40 + 20% de borracha + 15% de óleo extensor), a fim de verificar a viabilidade de implantação destas em trechos experimentais. Para isto, serão realizados os projetos de dosagem pelo método Marshall, além dos ensaios de resistência à tração por compressão diametral, de módulo de resiliência por compressão diametral com carga repetida e de fluência por compressão uniaxial estática.

1.6. A estrutura desta dissertação

O Capítulo 1 apresenta as considerações iniciais desta pesquisa, indicando, sucintamente, o problema objeto de estudo desta dissertação de mestrado, a alternativa para redução do problema levantado, isto é, o aproveitamento dos pneus inservíveis em pavimentação asfáltica, além de trazer um resumo das principais propriedades das misturas asfálticas preparadas com borracha de pneus, os objetivos da presente pesquisa e a organização da apresentação deste trabalho.

O Capítulo 2 traz uma apresentação das principais propriedades exigidas das misturas asfálticas, aspectos gerais sobre o problema da deformação permanente em revestimentos asfálticos e sobre os ensaios de resistência à tração por compressão diametral, módulo de resiliência por compressão diametral com carga repetida e fluência por compressão uniaxial estática.

O Capítulo 3 trata do emprego de pneus descartados em pavimentação asfáltica, com enfoque no ligante asfalto-borracha, apresentando detalhamento sobre os

seus componentes, produção, execução das misturas asfálticas e principais propriedades mecânicas destas misturas.

O Capítulo 4 traz a descrição dos materiais, equipamentos e procedimentos experimentais adotados na efetivação dos objetivos desta pesquisa. No Capítulo 5 são apresentados os resultados obtidos nos ensaios e é efetuada a análise estatística destes, incluindo a identificação de “outliers” e avaliação da repetibilidade. O Capítulo 6 traz as conclusões obtidas nesta pesquisa bem como algumas sugestões para pesquisas futuras.

No final, são apresentados os anexos, contendo os resultados detalhados dos ensaios realizados (Anexo A), da identificação de “outliers” (Anexo B) e da avaliação da repetibilidade destes ensaios (Anexo C), seguidos das referências bibliográficas dos trabalhos consultados e dos apêndices, nos quais são apresentados um resumo da norma ISO 5725 (Apêndice A) e os textos das leis brasileira e americana que regulamentam o tratamento dos pneus inservíveis (Apêndice B).

2. MISTURAS ASFÁLTICAS: PROPRIEDADES MECÂNICAS

2.1. Introdução

Neste capítulo é apresentado um resumo das principais propriedades mecânicas exigidas das misturas asfálticas, além de uma revisão detalhada sobre o problema da deformação permanente nas trilhas de roda, seguido de uma revisão dos principais estudos sobre os ensaios de resistência à tração por compressão diametral estática, módulo de resiliência e fluência por compressão uniaxial estática.

2.2. Principais propriedades mecânicas das misturas asfálticas

As principais características exigidas das misturas asfálticas para fins de pavimentação são:

- estabilidade;
- flexibilidade;
- durabilidade;
- resistência à derrapagem.

A “estabilidade” é a característica de uma mistura asfáltica de resistir à formação de deformações permanentes excessivas, quando submetida à ação de cargas está-

ticas e/ou repetidas. Uma discussão mais detalhada sobre a deformação permanente será apresentada posteriormente no item 2.3 deste capítulo.

A estabilidade é estudada, em laboratório, por meio de ensaios como o de fluência por compressão uniaxial e o ensaio de compressão triaxial, ambos realizados com carregamento estático ou dinâmico, o ensaio de compressão diametral com carregamento estático ou repetido e o ensaio de trilha de roda, utilizando equipamento simulador de tráfego ou mesmo pelo ensaio Marshall, que fornece a estabilidade Marshall da mistura.

Os principais fatores que interferem na estabilidade de uma mistura asfáltica estão indicados na Tabela 2.1 (pág. 16). Resumidamente, apontam-se os seguintes: tipo e teor de cimento asfáltico, natureza e teor do filer, forma e textura dos agregados e temperatura.

A “flexibilidade” é a propriedade da mistura de resistir à flexão sob a ação de cargas repetidas, sem que haja a ocorrência de fissuras, ou seja, corresponde à sua resistência à fadiga, e de se conformar às deformações permanentes da camada da base, característica esta também denominada “acomodabilidade”. São fatores de grande influência na flexibilidade de uma mistura a quantidade e as características do cimento asfáltico e também a temperatura. Temperaturas altas aumentam a flexibilidade, já que o cimento asfáltico é um material termossensível, e temperaturas mais baixas reduzem-na, tornando a camada mais rígida e com maior tendência a se tornar quebradiça. No laboratório, as características de fadiga de misturas asfálticas são medidas por meio de ensaios de flexão em vigas, de torção em amostras cilíndricas, de tração uniaxial, de tração indireta por compressão diametral e ensaios em amostras trapezoidais.

A “durabilidade” é a característica de uma mistura asfáltica de resistir à desintegração ou desagregação provocada pela ação do tráfego e do intemperismo, ao longo do tempo. Depende, fundamentalmente, da quantidade e das características físico-químicas do cimento asfáltico, da qualidade dos agregados minerais e do volume de vazios da mistura.

A “resistência à derrapagem” corresponde à propriedade da camada de revestimento asfáltico conferir resistência ao deslizamento dos pneus dos veículos. Esta resistência é função das características do pneu, do seu estado de conservação e da textura superficial da camada asfáltica. Um fator relevante para a obtenção de um revestimento com boas condições de atrito superficial é a granulometria dos agregados, com

especial atenção à presença de agregados graúdos com superfície rugosa. Revestimentos que apresentam excesso de cimento asfáltico tendem a exsudar, quando submetidos à ação do tráfego e/ou elevação da temperatura, resultando em uma diminuição do atrito superficial e, por consequência, prejudicando a segurança.

Quando uma ou mais destas propriedades das misturas asfálticas ficam prejudicadas ou mesmo outros aspectos relacionados às características funcionais e/ou estruturais do pavimento provocam queda do seu desempenho, algum tipo de intervenção é necessário, a fim de restabelecer as condições ideais de rolamento.

2.3. Deformações permanentes nas trilhas de roda

2.3.1. Aspectos gerais sobre deformações permanentes

As deformações permanentes são definidas, genericamente, como deformações diferenciais que ocorrem longitudinalmente em um pavimento e que se desenvolvem sob a ação das cargas do tráfego canalizado nas trilhas de roda (LAI, 1976; FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION, 1997).

Uma definição mais completa é apresentada por ANANI et al. (1990), que definem a deformação permanente como a formação de depressões longitudinais nas trilhas de roda devido ao acúmulo gradativo de deformações em uma ou mais camadas do pavimento. Segundos estes autores, muitos estudos apontam que a porção mais significativa das deformações permanentes ocorre de 7 a 10 cm medidos da superfície superior do pavimento. A taxa e a magnitude das deformações permanentes são função do carregamento e tempo de carregamento e volume de tráfego, pressão dos pneus dos veículos, temperatura e prática construtiva. Dentre os fatores ligados à camada asfáltica, podem ser citados: as propriedades do cimento asfáltico, dos agregados e da mistura por eles composta e a espessura das camadas.

Segundo a FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION (1997) há três tipos de deformação permanente:

- deformação permanente por movimentação plástica: depressão que se forma na região próxima ao centro de aplicação da carga dos veículos, com pequenas elevações em ambos os lados. Este tipo de deformação permanente é causado, na maior parte dos casos, por haver poucos vazios (menos que 4%) na mistura que compõe o revestimento. Nestas condições, uma compactação excessiva pode fazer com que o cimento asfáltico migre para os vazios existentes entre os agregados, reduzindo o intertravamento entre partículas. Além disso, sob temperaturas altas, o cimento asfáltico age mais como lubrificante que como ligante;
- deformação permanente por consolidação: depressão próxima ao centro de aplicação das cargas dos veículos, sem o surgimento de elevações laterais. Este tipo de deformação permanente é provocado por excesso de vazios na mistura (mais que 8%), após a compactação da camada de revestimento. Esta condição favorece a consolidação da camada nas trilhas de roda quando há a aplicação de carga pelos veículos, especialmente durante o primeiro período quente após a construção;
- deformação permanente por causa da deformação mecânica: é o resultado de um afundamento da camada de base, de sub-base ou do subleito, acompanhado por trincas de tração na parte inferior da camada do revestimento. Este tipo de defeito pode ocorrer quando o pavimento não é apropriadamente projetado para as cargas que irão solicitá-lo.

Há alguns fatores que podem reduzir a tendência de um revestimento asfáltico em apresentar deformação permanente, segundo a FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION (1997):

- misturas compostas por agregados cúbicos e que apresentam superfície áspera;
- teor de areia na mistura inferior a 15%;
- teor de asfalto escolhido em função das condições de temperatura na pista e do tipo de tráfego;
- a escolha de um teor ótimo de cimento asfáltico que se encontre no ramo seco da curva de vazios dos agregados minerais e que proporcione um volume de vazios na faixa de 3 a 5% ;

2.3.2. O mecanismo das deformações

Segundo COELHO (1996), as deformações nas trilhas de roda se desenvolvem gradualmente com o aumento do número de solicitações dos veículos pesados e normalmente aparecem sob a forma de depressões longitudinais nas linhas principais de rodagem, acompanhadas de elevações laterais ao longo dessas linhas. Essas deformações são provocadas pela ação combinada de densificação da camada de revestimento e deformação por cisalhamento. Tais deformações podem ocorrer em uma ou mais camadas do pavimento, inclusive no próprio subleito.

MAHBOUB (1990) diz que as respostas mecânicas de uma camada asfáltica, sob diferentes condições de carregamento, são o resultado de uma série de atividades internas complexas desta camada. Alguns pesquisadores lançaram a hipótese de que o movimento relativo dos agregados resulta em diferentes arranjos destas partículas, a fim de alcançar o equilíbrio. HILLS (1973) considera que este processo não é totalmente reversível e, após a remoção da carga, o equilíbrio é alcançado, restando alguma deformação permanente.

Segundo MAHBOUB (1990), outros pesquisadores oferecem explicações a respeito dos mecanismos envolvidos na reorientação das partículas e no colapso dos vazios. VAN DER LOO (1978), por exemplo, sugere que a reologia da mistura asfáltica, isto é, seu comportamento viscoso, é originária unicamente do comportamento viscoso do cimento asfáltico. O escoamento do cimento asfáltico nos vazios e a redução da espessura do filme de asfalto irá resultar na redução da distância relativa entre as partículas dos agregados. VAN DER LOO (1978) conclui que a reorientação das partículas de agregado pode ser causada pelo escoamento do cimento asfáltico nos vazios da mistura.

A Figura 2.3 (pág. 41) indica a resposta, aceita pela maioria dos pesquisadores, de uma mistura asfáltica sob a ação de carregamento estático ou repetido. Os dois critérios empregados na avaliação do desempenho de misturas quanto à sua capacidade de resistir à deformação permanente são: (a) quão rapidamente a deformação permanente crítica é alcançada e (b) a velocidade com a qual a mistura alcança o estágio de colapso ou estágio terciário. Estes dois critérios são mutuamente exclusivos. Uma mistura pode alcançar a deformação permanente crítica antes de se tornar instável ou pode se tornar instável antes de desenvolver a deformação permanente crítica (CARPENTER, 1993).

Segundo CARPENTER (1993), o início do colapso está relacionado a dois fatores principais, a saber, o volume de vazios da mistura e o nível de deformação não recuperável. Um critério para identificar o início do trecho de colapso da mistura é uma deformação de 2 a 3%. Uma boa mistura não irá sofrer densificação a ponto de alcançar um volume de vazios da ordem de 2%, ao passo que uma mistura de qualidade inferior irá sofrer uma densificação desse nível ou até maior e rapidamente irá atingir o colapso sob níveis de deformação permanente relativamente baixos. JIMENEZ (1993) também comenta que, de acordo com sua experiência, na idade de aproximadamente cinco anos, a camada asfáltica deve apresentar mais que 2% de volume de vazios a fim de não apresentar exsudação ou deformação permanente excessiva.

Segundo COELHO (1996), pesquisas mais recentes mostram que a deformação permanente se deve à fluência do material, sem variação do volume, e que a taxa de aumento dessas deformações são maiores no início do processo de solicitação da camada asfáltica, tendendo para um valor aproximadamente constante depois que um determinado número de solicitações foi atingido. Um aspecto importante a ser considerado, a este respeito, é a compactação adequada da camada asfáltica, a fim de conferir suficiente resistência à deformação permanente provocada por densificação.

2.3.3. Os fatores que influem nas deformações permanentes

Segundo a FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION (1997), os principais fatores que provocam o surgimento de deformação permanente em uma camada de revestimento asfáltico são:

- volume de vazios muito baixo, isto é, inferior a 4% ou excessivamente alto, ou seja, maior que 8%;
- cimentos asfálticos com baixa viscosidade, causada por:
 - erro no projeto da mistura, que pode ocorrer quando as propriedades do cimento asfáltico na pista são diferentes das de laboratório, normalmente determinadas nas temperaturas de 25 e 60°C;
 - não ocorrência do envelhecimento previsto durante o processamento em usina;

- existência de uma camada de óleo cru recobrindo o agregado, provocando contaminação e redução da viscosidade do cimento asfáltico;
- liberação do tráfego de veículos pesados antes de ocorrer uma completa aderência entre o cimento asfáltico e os agregados.
- consolidação posterior da base, da sub-base e/ou do subleito;
- a taxa e a duração da aplicação das cargas do tráfego colaboraram para a formação de deformação permanente; as misturas asfálticas são mais resistentes à aplicação de cargas de curta duração que de cargas de longa duração;
- quantidade e tipo de agregados presentes na mistura: porcentagens grandes de areia, filer e agregados arredondados diminuem a resistência da mistura à deformação permanente.

A Tabela 2.1, extraída de SOUZA et al. (1991)¹ apud COELHO (1996), apresenta um resumo dos principais fatores que influem nas deformações permanentes das misturas asfálticas e uma avaliação qualitativa dos efeitos que as variações nesses fatores provocam na resistência à formação de deformações permanentes.

ANANI et al. (1990) apresentam um estudo, desenvolvido na Arábia Saudita, que objetivou a identificação de quais fatores da mistura asfáltica influenciam a formação de deformação permanente. Neste estudo, sete rodovias foram selecionadas e, em cada uma delas, foram determinados pontos do pavimento para a coleta de amostras, com as quais foi realizada uma série de ensaios de laboratório, incluindo a caracterização dos agregados, dos cimentos asfálticos e das misturas e também ensaios de estabilidade Hveem, estabilidade e fluência Marshall e de módulo de resiliência. As conclusões deste trabalho foram:

- embora muitos pesquisadores considerem que a deformação permanente ocorra basicamente na camada de revestimento, a camada de base também contribui significativamente para a ocorrência deste fenômeno;
- os vazios dos agregados minerais e o módulo de resiliência podem fornecer indicações consistentes da resistência à deformação permanente;

¹SOUZA, J. B; CRAUSS, J.; MONISMITH, C. L. (1991). Summary report on permanent deformation in asphalt concrete. *Strategic Highway Research Program, National Research Council, SHRP-A/IR-91-104*, Washington, DC, 120 p.

Tabela 2.1. Fatores que influem nas deformações permanentes das misturas asfálticas.
[Fonte: SOUZA et al. (1991)¹ apud COELHO (1996)]

	fator	variação do fator	efeito da variação do fator na resistência à deformação permanente
agregados	textura superficial	lisa para rugosa	aumento
	granulometria	aberta para contínua	aumento
	formato	redonda para angulosa	aumento
	tamanho	aumento do tamanho máximo	aumento
cimento asfáltico	rigidez ^(a)	aumento	aumento
mistura	teor de ligante	aumento	redução
	volume de vazios ^(b)	aumento	redução
	vazios dos agregados minerais	aumento	redução ^(c)
	método de compactação	- ^(d)	- ^(d)
condições de campo e de ensaio	temperatura	aumento	redução
	estado de tensão/deformação	aumento da pressão de contato dos pneus	redução
	repetições do carregamento	aumento	redução
	água	seco para molhado	redução, se a mistura for sensível à água

^(a)Refere-se à rigidez na temperatura em que a resistência à deformação permanente está sendo avaliada. A adição de produtos modificadores das características do cimento asfáltico pode ser usada para aumentar a rigidez desse material, nas temperaturas críticas, com um consequente aumento da sua resistência à deformação permanente.

^(b)Quando o volume de vazios for inferior a 3%, a tendência à formação de deformação permanente aumenta.

^(c)Questiona-se atualmente se valores de vazios do agregado mineral (VAM) muito baixos, isto é, inferiores a 10%, devem ser evitados.

^(d)O método de compactação, tanto no campo como no laboratório, pode influir na estrutura do material e consequentemente na sua resistência à deformação permanente.

- contrariamente às conclusões obtidas em outros estudos, a diminuição do teor de cimento asfáltico não se mostrou um fator significativo na formação de deformação permanente;
- as propriedades da mistura asfáltica apresentam maior influência sobre a resistência à deformação permanente que as propriedades dos seus componentes (asfalto e agregados) estudados individualmente.

A temperatura ambiente e a duração da exposição ao sol afetam o desempenho do pavimento. Os materiais asfálticos são escuros e absorvem facilmente o calor, apresentando também um baixo coeficiente de condutividade térmica. Segundo alguns estudos realizados no Kuwait, a temperatura da camada superior do pavimento chega a 68°C quando a temperatura média diária é da ordem de 35°C. Medidas realizadas na Arábia Saudita, sob viadutos, onde o pavimento não recebe a incidência direta dos raios solares, indicaram que as deformações permanentes são pequenas e em alguns pontos não existem (ANANI et al., 1990). Um programa de monitoramento da temperatura do ar versus temperatura do pavimento, denominado LTPP (Long Term Pavement Performance), desenvolvido pelo programa SHRP, estabeleceu as equações 2.1 e 2.2 (MOHSENI, 1996) para previsão de temperaturas máximas e mínimas no pavimento, em função da latitude, da temperatura do ar e da profundidade, expressa em cm, até a superfície do pavimento:

$$T_{MÁX} = 54,32 + 0,77585 T_{AR} - 0,002468 Lat - 15,137 \log(H + 25) \quad (2.1)$$

$$T_{MÍN} = -1,56 + 0,71819 T_{AR} - 0,003966 Lat + 6,264 \log(H + 25) \quad (2.2)$$

onde: Lat = latitude;

T_{AR} = temperatura do ar;

H = profundidade, em cm.

OTENG-SEIFAH & MANKE (1976) desenvolveram uma pesquisa em duas rodovias do Estado de Oklahoma, nos EUA, a fim de investigar as causas das deformações permanentes em pavimentos flexíveis de alta qualidade e detectar os possíveis fatores ligados à camada de revestimento que contribuem para a formação deste tipo de defeito. Os resultados desta pesquisa são:

- a densificação provocada pela ação das cargas do tráfego contribui significativamente para o acúmulo de deformação permanente na camada de revestimento;
- na maior parte das seções de teste foi constatada a ocorrência de instabilidade lateral do revestimento asfáltico. Tal fenômeno foi o responsável, segun-

do este estudo, entre 30 a 78% do acúmulo de deformações permanentes nesses locais;

- as deformações da base e do subleito influenciam a magnitude da deformação permanente em muitas das seções. A consolidação e ruptura por cisalhamento nestas camadas ocultam o efeito da fluência lateral do revestimento asfáltico.

MERIGHI (1999) também realizou um estudo a respeito da deformação permanente em misturas asfálticas convencionais empregadas em corredores de ônibus da cidade de São Paulo, por meio de dois ensaios de laboratório: o ensaio de fluência por compressão uniaxial dinâmica e o ensaio de trilha de roda com o equipamento simulador de tráfego ou “LCPC (Laboratoire Central des Ponts et Chaussées) Wheel Tracking”. As principais conclusões deste trabalho são:

- a resistência à deformação permanente, avaliada pelo ensaio com o simulador de tráfego, é bastante influenciada pela temperatura: o efeito provocado pelo aumento da temperatura de 25 para 50°C é dez vezes mais danoso ao pavimento que o provocado pela duplicação do volume de tráfego;
- a resistência à deformação permanente, avaliada pelo ensaio de fluência por compressão uniaxial dinâmica, é crescente com o aumento da temperatura, é função do tempo de exposição de carregamento e também da magnitude do carregamento;
- os resultados obtidos pelo ensaio de fluência por compressão uniaxial dinâmica são compatíveis com os obtidos do ensaio com o equipamento simulador de tráfego.

COELHO (1996) realizou um estudo a respeito da influência da granulometria das misturas e da temperatura de ensaio sobre a resistência à deformação permanente, por meio de dois ensaios: o de fluência por compressão uniaxial estática e o ensaio com o equipamento simulador de tráfego “LCPC Wheel Tracking”. As principais conclusões deste trabalho são:

- o ensaio de trilha de roda, realizado em laboratório com o equipamento simulador de tráfego, é reconhecido como um dos melhores instrumentos para a avaliação da capacidade de um concreto asfáltico de suportar deformações permanentes, em condições similares às condições reais, embora não consiga reproduzir fielmente a estrutura real de um pavimento nem as condições re-

ais de solicitações. A dispersão dos resultados desse ensaio pode ser relativamente grande, dependendo de fatores como tipo de mistura e condições de realização do ensaio;

- o ensaio de fluência por compressão uniaxial estática utilizando corpos-de-prova moldados pelo método Marshall é um instrumento viável e promissor na avaliação da capacidades das misturas asfálticas de suportar deformações permanentes, embora o uso deste método de compactação pareça não ser uma das melhores alternativas;
- as faixas granulométricas “B” e “C” da ABNT geram misturas asfálticas com boa resistência à deformação permanente e as misturas com porcentagem elevada de agregados graúdos parecem ter maior estabilidade térmica e mecânica;
- a temperatura de ensaio (na prática, a temperatura de serviço) tem influência significativa nos valores das deformações permanentes, dependendo da granulometria da mistura. No caso específico das misturas estudadas, quando a temperatura de ensaio passa de 40 para 60°C, o número de ciclos de aplicação de carga, para um mesmo valor de deformação permanente, variou segundo um fator superior a 10, isto é, a 40°C o número de solicitações necessário para provocar uma mesma deformação permanente é, no mínimo, 10 vezes maior do que o correspondente à temperatura de 60°C.

AL-ABDUL WAHHAB et al. (1995) apresentam as conclusões de um estudo, desenvolvido nas 12 maiores rodovias da Arábia Saudita, a respeito dos fatores que podem provocar deformação permanente. Nas seções mais problemáticas, as deformações permanentes medidas variaram de 1,5 a 7,0 cm. A temperatura na camada superficial do pavimento, medida neste estudo, chegou a 70°C nos meses mais quentes do ano. Algumas conclusões deste estudo são:

- os valores de módulo de resiliência de amostras retiradas das faixas de maior velocidade (menor carga) de seções que não apresentavam deformação permanente excessiva são maiores que os obtidos das amostras retiradas das faixas de maior velocidade de seções com deformação permanente excessiva;
- os autores propuseram um método subjetivo para identificação de misturas resistentes à deformação permanente, baseado nos resultados dos ensaios de trilha de roda e módulo de resiliência (Tabela 2.2.);

Tabela 2.2. Método subjetivo de identificação de misturas resistentes à deformação permanente. [Fonte: AL-ABDUL WAHHAB et al. (1995)]

resistência à deformação permanente	deformação permanente (wheel tracking test, mm/10 ⁴ ciclos)	M _R (25°C, MPa)
muito boa	< 2,0	> 3 300
boa	2,0 – 3,5	3 000 – 3 300
média	3,5 – 5,0	2 600 – 3 000
baixa	> 5,0	< 2 400

- é necessário que o volume de vazios “in situ” das misturas esteja acima de 5%, a fim de diminuir a probabilidade de ocorrência de deformação permanente excessiva prematura nas camadas asfálticas;
- a deformação permanente na Arábia Saudita é causada principalmente pelo efeito combinado das cargas dos veículos pesados e das altas pressões dos pneus e também por longos períodos de calor.

AL-ABDUL WAHHAB et al. (1995) estudaram as características do subleito nas seções analisadas, a fim de verificar a relação entre a resistência do subleito e a deformação permanente no pavimento. Para alguns métodos de projeto de pavimentos, como o método do INSTITUTO DO ASFALTO (1981)² e o método da AASHTO (1993)³, a deformação permanente é provocada por problemas no subleito que se refletem na superfície do pavimento. Os resultados obtidos neste estudo evidenciam que, em todas as seções analisadas, a deformação permanente não se iniciou no subleito e sim ocorreu nos 10 cm superiores do pavimento.

Segundo estes autores, isto não significa que o controle de campo durante a preparação do subleito possa ser menos rigoroso. Os resultados de CBR (“California Bearing Ratio”) do subleito nas seções analisadas indicaram que a redução de 1% na densidade da camada resulta em uma queda de pelo menos 8% no CBR medido “in situ”.

²THE ASPHALT INSTITUTE (1981). Thickness design – asphalt pavements for highways and streets, MS-1.

³AASHTO (1993). AASHTO guide for design of pavement structures, Washington, D.C.

2.3.4. Caracterização da deformação permanente pelo ensaio de fluência por compressão uniaxial estática

Segundo MAHBOUB (1990), as deformações permanentes ou não recuperáveis de uma camada asfáltica de um pavimento podem ser caracterizadas pelo ensaio de fluência por compressão uniaxial. Embora muitos pesquisadores estejam de acordo a esse respeito, algumas discordâncias existem com relação ao tipo de ensaio, se estático, dinâmico ou cíclico, que deveria ser usado para caracterizar apropriadamente a resistência à deformação permanente de uma mistura asfáltica.

LAI (1976) diz que o comportamento “deformação x tempo” de um material viscoelástico pode ser caracterizado por meio do ensaio de fluência por compressão uniaxial estática. Porém, segundo este mesmo autor, o concreto asfáltico não é um material que apresenta viscoelasticidade linear, mesmo sob tensões baixas. A teoria da viscoelasticidade linear não proporciona uma previsão precisa, por exemplo, da curva de recuperação em um ensaio de fluência por compressão uniaxial, uma vez que são verificadas deformações não recuperáveis ao longo do ensaio.

Os pesquisadores da Shell e VAN DER LOO (1974, 1978)^{4,5}, pioneiros no emprego do ensaio de fluência estática, desenvolveram critérios de fluência e deformação permanente com base neste tipo de ensaio. Outros apresentam modelos de previsão de deformação permanente baseados em ensaios com carga repetida, como o sistema VESYS⁶ de modelagem viscoelástica e o modelo modificado Illinois para pavimentos.

⁴VAN DER LOO, P. J. (1974). Creep test, a simple tool to judge asphalt mix stability. *Association of Asphalt Paving Technologists (AAPT)*, Proceedings, v. 43, p. 253-284.

⁵VAN DER LOO, P. J. (1978). The creep test, a key tool in asphalt mix evaluation and in prediction of rutting. *Association of Asphalt Paving Technologists (AAPT)*, Proceedings, v. 47, p. 522-557.

⁶VESYS é um software para análise mecânica e previsão de desempenho de pavimentos flexíveis, desenvolvido por W. J. Kenis (ver referências abaixo). Foi o primeiro modelo que incluiu algoritmos de previsão para vários tipos de defeitos, incluindo deformação permanente, trincas por fadiga, irregularidade longitudinal e índice de serventia (PSI – present serviceability index).

KENIS, W. J. (1977). *Predictive design procedures: a design method for flexible pavements using the VESYS structural subsystem*, Proceedings, 4th International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements, vol. 1, University of Michigan, Ann Arbor, p. 101-147.

KENIS, W. J. (1978). *Predictive design procedure, VESYS users manual - an interim design for flexible pavements using VESYS structural subsystem*. Federal Highway Administration, U.S. Department of Transportation, FHWA-RD-77-154.

Pesquisadores do Corpo de Pesquisadores Rodoviários da Austrália investigaram o desempenho do ensaio com carregamento estático e com o de carregamento repetido (KINDER, 1986⁷ apud MAHBOUB, 1990). Kinder constatou que embora a magnitude das deformações viscoplásticas seja diferente, dependendo do tipo de ensaio realizado, os valores das deformações irreversíveis são parecidos em ambos os ensaios. Esta conclusão está de acordo, segundo MAHBOUB (1990), com o estudo efetuado por Van der Poel, em 1954, descrevendo as respostas dinâmica e estática dos cimentos asfálticos.

Esta discussão sugere que talvez nenhum método simples seja completo para simular o comportamento das misturas no campo quanto à tendência à formação de deformação permanente e que há a necessidade do desenvolvimento de um método racional de projeto e análise de misturas asfálticas.

O modelo viscoelástico VESYS para deformação permanente, desenvolvido em 1978, caracteriza a deformação permanente como uma função do tempo de carregamento, empregando a seguinte equação exponencial:

$$\varepsilon_{vp} = at^b \quad (2.3)$$

Um outro modelo foi apresentado por PERL et al. (1984)⁸ apud MAHBOUB (1990) e é aplicável para os ensaios de fluência por compressão e por tração:

$$\varepsilon_{vp} = a(\sigma)t^b \quad (2.4)$$

Em ambos os casos:

a = coeficiente que depende do nível de tensão aplicada e da rigidez da mistura;

⁷KINDER, D. F. (1996). A study of both the viscoelastic and permanent deformation properties of a New South Wales asphalt. *13th Australian Road Research Board*, New South Wales, Australia, p. 1-11.

⁸PERL, M.; UZAN, J.; SIDES, A. (1984) Visco-elastic-plastic constitutive law for bituminous mixtures under repeated loading. *Transportation Research Record*, Transportation Research Board, n. 911, p. 20-26.

b = coeficiente que representa a taxa de deformação em função do tempo. Este valor está contido em um intervalo estreito de valores para misturas asfálticas de boa qualidade, quando ensaiadas sob níveis de tensão que se enquadrem na região de viscoelasticidade linear. Diversos pesquisadores citados por MAHBOUB (1990) e LITTLE et al. (1993) apontam que os valores de “ b ” geralmente variam entre 0,17 e 0,25;

t = tempo de aplicação do carregamento;

σ = tensão provocada pelo carregamento aplicado;

ϵ_{vp} = deformação específica viscosa ou viscoplástica;

Estudos desenvolvidos por alguns pesquisadores citados por MAHBOUB (1990) indicam que o acúmulo de deformação permanente não é linearmente proporcional ao nível de tensão aplicado. Esta relação entre tensão e deformação assume uma forma linear num gráfico dilogarítmico e a declividade da reta é aproximadamente igual a 1,61 para misturas asfálticas convencionais. E o intercepto desta reta é função do tipo de mistura. Misturas com baixa resistência à deformação permanente apresentam, no gráfico dilogarítmico, maiores valores do intercepto ao passo que a declividade da reta se mantém aproximadamente a mesma.

SOUZA et al. (1991)⁹ apud LITTLE et al. (1993) apontam que as variáveis de maior influência sobre os parâmetros do ensaio de fluência estática e que também influenciam a resistência à deformação permanente das misturas asfálticas são, por ordem decrescente de importância: volume de vazios da mistura asfáltica, tipo de agregado, nível de tensão, temperatura, tipo e teor de cimento asfáltico.

SILVEIRA (1999) empregou os ensaios de compressão uniaxial estática e de compressão uniaxial dinâmica para a avaliação da resistência à deformação permanente de misturas de areia-asfalto a frio. Foram confeccionadas, pelo método de compactação Marshall, duas séries de corpos-de-prova, uma utilizando emulsão asfáltica convencional de ruptura lenta e outra utilizando emulsão asfáltica modificada com polímero, produzida pela Ipiranga Asfaltos e comercializada com a designação Emulex®, a fim de comparar o desempenho das duas.

⁹SOUZA, J. B.; HARVEY, J.; PAINTER, L.; DEACON, J. A.; MONISMITH, C. L. (1991). Evaluation of laboratory procedures for compacting asphalt aggregate mixtures. *Institute of Transportation Studies*, University of California.

SILVEIRA (1999) concluiu que as misturas ensaiadas tanto pelo “creep” estático quanto pelo “creep” dinâmico são pouco resistentes à deformação permanente. Observou também que, de maneira geral, o desempenho das misturas nas quais se empregou emulsão asfáltica convencional foi superior ao das misturas realizadas com a emulsão asfáltica modificada com polímero.

FORETTI (1999) utilizou o ensaio de compressão uniaxial estática, empregando corpos-de-prova moldados pelo método de compactação Marshall, para avaliar e comparar o desempenho de misturas preparadas com asfalto convencional (CAP 20) e de misturas preparadas com asfalto modificado com polímero (Betuflex B 80/60). Como resultado da pesquisa, este autor observou que houve uma tendência de aumento da capacidade da mistura feita com cimento asfáltico modificado com polímero em resistir às deformações permanentes.

SÁ & MOTTA (1995) realizaram ensaios de “creep” estático com corpos-de-prova moldados no compactador Marshall e tentaram estabelecer correlações dos parâmetros densidade aparente, volume de vazios e estabilidade Marshall com as respectivas deformações permanentes obtidas no ensaio de “creep” estático, e verificaram que não há correlação entre estes parâmetros.

COELHO (1996) empregou o ensaio de fluência estática no estudo da deformação permanente em misturas asfálticas de granulometrias diversas e concluiu que ele não é uma ferramenta adequada para distinguir diferenças de comportamento entre as misturas avaliadas, embora tivesse sido possível verificar sua eficiência como instrumento para a avaliação do potencial daquelas misturas em resistir às deformações permanentes. Possivelmente, segundo este autor, a causa da pequena sensibilidade deste ensaio às variações granulométricas das misturas estudadas esteja associada ao uso de corpos-de-prova moldados pelo método Marshall, considerado, pelos principais pesquisadores que utilizam o ensaio de fluência estática, como inadequado para a compactação de corpos-de-prova a serem empregados neste ensaio.

TAIRA (2001) empregou o ensaio de fluência estática na comparação do desempenho de uma mistura asfáltica modificada com polímero SBS (Betuflex B 65/60) com uma mistura convencional (CAP 20) e concluiu que este ensaio não conseguiu diferenciar claramente o comportamento das duas misturas. AMARAL (2000) empregou o ensaio de fluência estática para comparar o desempenho de uma mistura asfáltica modificada com polímero SBS (Betuflex B 65/60), empregando seixo rolado como agregado graúdo, com uma mistura convencional (CAP 40) e observou desem-

penho superior da mistura modificada quanto à deformação recuperável e inferior quanto à deformação total, deformação não recuperável e módulo de fluência.

2.3.5. Valores limites para a deformação permanente

A Tabela 2.3 (MAHBOUB, 1990) indica alguns valores limites para a deformação permanente, extraídos da “Federal Highway Administration”, de 1978. Este órgão classifica as deformações permanentes em três níveis: alto, médio e baixo. Por considerações de segurança, uma outra classe de deformação abaixo da classe “baixo”, denominada “condição de hidroplanagem”, foi introduzida por alguns pesquisadores citados por MAHBOUB (1990), a fim de considerar também o efeito da hidroplanagem.

Tabela 2.3. Classificação da deformação permanente por nível de severidade. [Fonte: MAHBOUB (1990)]

nível de severidade	profundidade média da trilha de roda (mm)
condição de hidroplanagem	5,08 – 6,35
baixo	6,36 – 12,70
médio	12,71 – 25,40
alto	acima de 25,40

A especificação francesa para deformação permanente (AFNOR, 1999) determina que a profundidade da trilha de roda, em porcentagem da espessura da camada asfáltica, para uma espessura de 10 cm, após passagem de carga de 30 000 ciclos, a 60°C, para misturas com volume de vazios entre 5 e 8%, deve ser menor que 10% na classe 1 (rodovias de menor padrão de qualidade), menor que 7,5% na classe 2 e menor que 5% na classe 3 (rodovias de maior padrão de qualidade).

A fim de limitar a magnitude das deformações permanentes na pista, alguns pesquisadores sugerem valores limites para o módulo de rigidez da mistura, medida por meio do ensaio de fluência por compressão uniaxial estática, sob condições específicas de temperatura e de tempo de carregamento (Tabela 2.4). Porém SOUZA et al.(1991)¹

apud COELHO (1996) advertem que tais valores devem estar associados a condições climáticas e de tráfego específicas e não devem ser adotados sem uma cuidadosa avaliação de sua validade para cada situação.

Tabela 2.4. Valores limites para o módulo de fluência, no ensaio de fluência por compressão uniaxial estática. [Fonte: SOUZA et al (1991)¹ apud COELHO (1996)]

referência	temperatura do ensaio (°C)	tempo de ensaio (min)	tensão aplicada (MPa)	módulo de fluência (MPa)
VILJOEN & MEADOWS (1981) ¹⁰	40	100	0,2	≥ 80
KRONFUSS et al. (1984) ¹¹	40	60	0,1	≥ 50-65
FINN et al. (1983) ¹²	40	60	0,2	≥ 135

2.4. Alguns ensaios para determinação de propriedades mecânicas das misturas asfálticas

2.4.1. Introdução

Segundo THE SHELL BITUMEN HANDBOOK (1991), a abordagem analítica do projeto de pavimentos está baseada no conhecimento dos vários materiais usados nas camadas do pavimento. Os ensaios de laboratório são utilizados extensivamente com o objetivo de proporcionar maior entendimento do comportamento mecânico destes materiais.

¹⁰VILJOEN, A. W.; MEADOWS, K. (1981). The creep test – a mix design tool to rank asphalt mixes in terms of their resistance to permanent deformation under heavy traffic. *National Institute for Transport and Road Research*, Pretoria, Sout Africa, Technical Note TP-36-81.

¹¹KRONFUSS, F.; KRZEMIEN, R.; NIEVELT, G.; PUTZ, P. (1984). Verformungsfestigkeit von asphalten ermittlung im Kriechtest. *Bundesministerium fur Bauten and Technik*, Strassenforschung, Helf 240, Vien, Austria.

¹²FINN, F.; MONISMITH, C. L.; MARKEVICH, N. J. (1983). Pavement performance and asphalt concrete mix design. *Association of Asphalt Paving Technologists (AAPT)*, Proceedings, v. 52.

Há dois aspectos relevantes das propriedades dos materiais a serem considerados no projeto de um pavimento: o comportamento tensão-deformação, para a análise da estrutura, e as características de desempenho destes materiais, as quais irão determinar a falência da estrutura. Os dois principais critérios de desempenho são as trincas por fadiga e a deformação permanente.

Teoricamente, o conhecimento das propriedades mecânicas dos materiais “in situ” é necessário para a realização de projetos. No entanto, os ensaios “in situ” ou trechos experimentais são, em muitos casos, impraticáveis, o que obriga a realização de ensaios em laboratório, como alternativa para a caracterização dos materiais e estudo de desempenho. Estes deveriam reproduzir a situação de campo o mais fielmente possível, isto é, temperatura, tempo de carregamento, estados de tensão, grau de compactação, etc. Contudo, as condições “in situ” mudam continuamente e, portanto, a seleção de condições de ensaio apropriadas é extremamente difícil.

Assim, surgiram ensaios simplificados que conseguem reproduzir certos aspectos do comportamento “in situ” dos materiais empregados em obras de pavimentação. Estes podem ser divididos em três grupos:

- fundamentais: ensaio triaxial com carga repetida, ensaio de fluência por compressão uniaxial estática, ensaio de tração indireta, de módulo de resiliência e de resistência à fadiga;
- de simulação: ensaio de trilha de roda;
- empíricos: ensaio Marshall.

Neste contexto, foram escolhidos os ensaios Marshall, resistência à tração por compressão diametral, módulo de resiliência e fluência por compressão axial estática e dinâmica para a caracterização mecânica das três misturas estudadas nesta pesquisa.

2.4.2. Ensaio de resistência à tração por compressão diametral

2.4.2.1. Método de ensaio

O ensaio de tração indireta por compressão diametral, também conhecido por “ensaio brasileiro”, foi desenvolvido por Lobo Carneiro, com a finalidade de deter-

minar a resistência à tração de corpos-de-prova de concreto de cimento Portland. Consiste na aplicação de uma carga estática de compressão distribuída ao longo de duas geratrizes opostas, como ilustrado na Figura 2.1, a fim de se obter tensões de tração ao longo do diâmetro horizontal, perpendicular à carga.

Figura 2.1. Ensaio de tração indireta em amostra cilíndrica. [Adaptado de PINTO & PREUSSLER (1980)]

O método de ensaio DNER-ME 138/94 apresenta o procedimento para a realização deste ensaio. Em linhas gerais deve ser assim realizado:

- medir a altura (H) do corpo-de-prova com paquímetro, em quatro posições diametralmente opostas; adotar como altura a média aritmética das quatro leituras;
- medir o diâmetro (D) do corpo-de-prova com paquímetro, em três posições. Adotar como diâmetro a 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, 30, 45 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 das duas metades do corpo-de-prova, segundo o plano diametral vertical;
- com o valor de carga de ruptura (F) obtido, calcula-se a resistência à tração do corpo-de-prova segundo a expressão:

$$\sigma_R = \frac{2F}{100\pi DH} \quad (2.5)$$

onde: σ_R = resistência à tração, MPa;

F = carga de ruptura, N;

D = diâmetro do corpo-de-prova, cm;

H = altura do corpo-de-prova, cm

2.4.2.2. A modelagem matemática do ensaio de tração indireta por compressão diametral

A partir do desenvolvimento do ensaio de tração indireta por compressão diametral, FROCHT (1948)¹³ e TIMOSHENKO & GOODIER (1951)¹⁴ mostraram, matematicamente, que uma carga de compressão uniforme, aplicada perpendicularmente,

larmente ao plano diametral horizontal de um disco delgado, gera uma tensão de tração uniforme ao longo do plano diametral vertical que contém a carga, admitindo estado plano de tensões. Um tratamento matemático simples para estes ensaios foi desenvolvido por FROCHT (1948)¹³, por meio de análise fotoelástica de cilindros plásticos (SCHMIDT, 1972).

Segundo SCHMIDT (1972), quando as considerações feitas pelos autores citados anteriormente são aplicadas a cilindros carregados dinamicamente ao longo de seu diâmetro, é possível determinar o módulo de resiliência de um material. Segundo FROCHT (1948)¹³ as tensões de tração (σ_x) e de compressão (σ_y), ao longo do diâmetro (D) horizontal do corpo-de-prova e perpendicularmente ao plano de aplicação da carga (F), são dadas por:

$$\sigma_x = \left[\frac{2F}{\pi t D} \left(\frac{D^2 - 4x^2}{D^2 + 4x^2} \right) \right]^2 \quad (2.6)$$

$$\sigma_y = -\frac{2F}{\pi t D} \left[\frac{4D^2}{(D^2 + 4x^2)^2} - 1 \right] \quad (2.7)$$

onde: t = altura do disco ou cilindro;

x = distância medida a partir da origem, ao longo da abcissa (Figura 2.2).

Uma distribuição típica dessas tensões está representada na Figura 2.2. Considerando estado plano de tensões (plane stress) e comportamento elástico, a expressão para a deformação ϵ_x , ao longo do diâmetro, é:

$$\epsilon_x = \frac{1}{E} [\sigma_x - \mu(\sigma_y + \sigma_z^0)] \quad (2.8)$$

onde μ é o coeficiente de Poisson. Substituindo σ_x e σ_y na expressão 2.8 tem-se:

¹³FROCHT, M. M. (1948). Photoelasticity, v. 2, John Wiley and Sons, New York.

¹⁴TIMOSHENKO, S.; GOODIER, J. N. (1951). Theory of Elasticity, 2nd ed., McGraw-Hill, New York.

Figura 2.2. Distribuição de tensões. [Adaptado de SCHMIDT (1972)]

$$\epsilon_x = \frac{2F}{E\pi tD} \left[\frac{(4D^2\mu - 16D^2x^2)}{(D^2 + 4x^2)^2} + (1 - \mu) \right] \quad (2.9)$$

A deformação total (Δ) é a integral da deformação entre $-D/2$ e $+D/2$:

$$\Delta = \int_{-D/2}^{+D/2} \epsilon_x dx \quad (2.10)$$

Integrando:

$$E = F \left(\frac{\mu + 0,2732}{t\Delta} \right) \quad (2.11)$$

Para materiais puramente elásticos, a equação 2.11 poderia ser aplicada para carregamentos tanto estáticos quanto dinâmicos. No caso de materiais viscoelásticos, como as misturas asfálticas, esta equação permite calcular o módulo de resiliência ($E = M_R$), desde que o carregamento repetido seja pontual e de curta duração, a fim de minimizar o efeito da viscosidade da massa asfáltica.

A distribuição das tensões no plano diametral vertical (eixo y) é descrita pelas seguintes equações:

$$\sigma_x = \frac{2F}{\pi t D} \quad (2.12)$$

$$\sigma_y = -\frac{2F}{\pi t D} \left(\frac{2D}{D-2y} + \frac{2D}{D+2y} - 1 \right) \quad (2.13)$$

Segundo PINTO E PREUSSLER (1980), as equações de Focht têm certa limitação para as misturas asfálticas, considerando a hipótese de homogeneidade e de comportamento elástico-linear, admitido no desenvolvimento da teoria. Estudos têm mostrado que a heterogeneidade do material modifica de certo modo a lei de distribuição de tensões. Contudo, as formulações teóricas, somadas ao aperfeiçoamento das técnicas de ensaios de laboratório, têm conduzido à determinação de parâmetros considerados satisfatórios para uso corrente.

De acordo com SCHMIDT (1972), é possível assumir uma faixa de valores de coeficiente de Poisson, sem incorrer em erros grosseiros no cálculo do módulo de resiliência. Ele afirma que o valor de “ μ ” igual a 0,35, para misturas asfálticas, resulta em uma boa aproximação entre os valores de “ M_R ” determinado pelo ensaio de tração indireta e aqueles obtidos por meio de outros métodos, empregando temperatura igual a 23°C (73°F).

SCHMIDT (1972) cita outros trabalhos que apresentam valores do coeficiente de Poisson para misturas asfálticas: SAYEGH (1967)¹⁵ mostrou que “ μ ” pode variar de 0,2 a 0,5, dependendo do nível de deformação; DEHLEN (1969)¹⁶ demonstrou que os valores de “ μ ” podem variar entre 0,35 a 0,50, dependendo da temperatura e dos níveis de deformação e CRAGG & PELL (1971)¹⁷ verificaram que, para temperatura ambiente, é razoável adotar o valor de 0,35 para “ μ ”.

¹⁵SAYEGH, G. (1967). Proceedings of 2nd International Conference on Structural Design of Asphalt Pavement, p. 743.

¹⁶DEHLEN, G. L. (1969). PhD Thesis, University of California, Berkeley.

¹⁷CRAGG, Z; PELL, P. S. (1969). Proceedings of the Association of Asphalt Paving Technologists, v. 40, p. 126.

2.4.3. Ensaio de módulo de resiliência por compressão diametral dinâmica

2.4.3.1. Introdução

O módulo de resiliência ou módulo de elasticidade dos materiais que constituem as camadas de um pavimento é utilizado no seu dimensionamento por meio do método racional. Ferramentas computacionais, como os programas ELSYM5, elaborado pela Universidade da Califórnia; CHEV5L, desenvolvido pela “Chevron Research Corporation”; FEPAVE II e outros, empregam o módulo de resiliência e o coeficiente de Poisson dos materiais constituintes das camadas no cálculo dos valores das tensões e deformações, em qualquer ponto do pavimento, provocados pela aplicação de carga. Os resultados das análises são, em geral, pouco sensíveis a variações do coeficiente de Poisson e são freqüentemente usados valores médios deste parâmetro. Os dois primeiros programas consideram a estrutura como um sistema elástico-linear e o último, baseado no método dos elementos finitos, considera o comportamento elástico não linear do pavimento.

Segundo QUEIROZ & VISSER (1978), os procedimentos utilizados para a determinação do módulo de elasticidade de misturas asfálticas incluem ensaios estáticos e dinâmicos. Os primeiros podem ser adequados, por exemplo, para o dimensionamento de pavimentos de pátios de estacionamentos industriais, ao passo que os últimos são mais convenientes para o projeto de pavimentos de rodovias e pistas de pouso e decolagem, uma vez que são submetidos a cargas de natureza dinâmica.

O módulo de resiliência (M_R) de misturas asfálticas é a relação entre a tensão de tração (σ_t), aplicada repetidamente no plano diametral vertical de uma amostra cilíndrica, e a deformação específica recuperável (ϵ_t) correspondente à tensão aplicada, a uma determinada temperatura (T):

$$M_R = \left(\frac{\sigma_t}{\epsilon_t} \right)_T \quad (2.14)$$

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 dos revestimentos asfálticos na região onde ocorrem deformações específicas de tração, responsáveis pela fadiga da camada e, consequentemente, pela vida de serviço da estrutura (PINTO E PREUSSLER, 1980).

Segundo QUEIROZ & VISSER (1978), os materiais elásticos ideais apresentariam sempre o mesmo módulo de elasticidade, independentemente do tipo de ensaio. Os materiais componentes da estrutura de um pavimento comportam-se de modo elástico apenas de maneira aproximada, podendo ser considerados materiais elásticos nas ocasiões em que são submetidos a carregamentos repetidos, de curta duração e que geram tensões relativamente baixas. Tais condições são semelhantes às aquelas existentes em um pavimento.

Um estudo da Universidade do Texas, realizado por GONZALES et al. (1975)¹⁸ apud QUEIROZ & VISSER (1978), avaliou alguns dos métodos mais utilizados em laboratório para a determinação das propriedades fundamentais dos materiais e concluiu que o ensaio de compressão diametral é o mais conveniente para a determinação das características resilientes das misturas asfálticas, por causa das seguintes razões:

- é um ensaio de execução relativamente simples;
- a ruptura não é seriamente afetada pelas condições superficiais;
- a ruptura inicia-se numa região de tensão de tração relativamente uniforme;
- o coeficiente de variação dos resultados é baixo quando comparado com outros métodos de ensaio;
- o ensaio pode fornecer informações sobre o módulo de resiliência, o coeficiente de Poisson e as características de fadiga e de deformação permanente.

Além disso, este ensaio simula o estado de tensão na parte inferior da camada asfáltica de um pavimento, onde ocorrem tensões de tração oriundas da ação das cargas aplicadas pelo tráfego.

¹⁸GONZALES, 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.

2.4.3.2. Método de ensaio

O ensaio de módulo de resiliência está baseado no ensaio de resistência à tração por compressão diametral com carregamento dinâmico. O procedimento de ensaio é o DNER-ME 133/94, que, em linhas gerais, prescreve:

- posicionamento do corpo-de-prova na base da estrutura de suporte, entre dois cabeçotes curvos;
- fixação e ajuste dos transdutores tipo LVDT (“linear variable differential transformer”) de modo a se obter o registro dos deslocamentos;
- assentamento correto do pistão de carga e dos cabeçotes no corpo-de-prova;
- fase de acondicionamento: aplicação de 200 ciclos da carregamento vertical (F), diametralmente, no corpo-de-prova, de modo a se obter uma tensão (σ) menor ou igual a 30% da resistência à tração determinada no ensaio de compressão diametral estático. Recomenda-se a aplicação da menor carga (F), capaz de fornecer um registro mensurável. A frequência de aplicação da carga (F) é de 60 ciclos por minuto, com duração de 0,1 s. O registro dos deslocamentos resilientes deve ser feito para 300, 400 e 500 aplicações da carga (F);
- com os valores obtidos, são calculados os módulos de resiliência, utilizando a expressão 2.13. O módulo de resiliência do corpo-de-prova ensaiado será a média aritmética dos valores determinados a 300, 400 e 500 aplicações de carga.

$$M_R = \frac{F}{100\Delta H} (0,9976\mu + 0,2692) \quad (2.15)$$

onde: M_R = módulo de resiliência, MPa;

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

Δ = deformação elástica ou resiliente para 300, 400 e 500 aplicações de carga, cm;

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

μ = coeficiente de Poisson, adimensional.

O método de ensaio DNER-ME133/94 recomenda o valor de 0,30 para o coeficiente de Poisson e que, quando a temperatura de ensaio não for especificada, o módulo de resiliência deverá ser determinado na temperatura de $30^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$.

2.4.3.3. Estudos sobre o módulo de resiliência de misturas asfálticas

O estudo apresentado por PINTO & PREUSSLER (1980), empregou ensaios de compressão diametral dinâmica para a determinação dos módulos de resiliência de misturas asfálticas. Foram ensaiadas misturas com dois tipos de cimento asfáltico: CAP 50/60 E CAP 85/100, provenientes das refinarias Duque de Caxias e Paulínea, nas três faixas granulométricas do DNER: faixas A, B e C, empregando agregados tipo gnaiss e gnaiss granitóide, para concretos asfálticos utilizados como “binder” e camada de rolamento (capa).

Algumas das conclusões deste trabalho são:

- não houve influência marcante da faixa granulométrica sobre os valores de módulo de resiliência e resistência à tração. Contudo, foi observado uma tendência de aumento da resistência à tração com o teor de asfalto, para o teor ótimo, evidenciando que misturas ricas em asfalto proporcionam, sob certas condições, revestimentos de boa qualidade;
- genericamente, o CAP 50/60 conferiu às misturas valores de módulo de resiliência e resistência à tração superiores àqueles encontrados com o CAP 85/100, ficando patente a influência da viscosidade do cimento asfáltico sobre a rigidez da mistura (Tabela 2.5);

Tabela 2.5. Influência da viscosidade do cimento asfáltico sobre os resultados dos ensaios.
[Fonte: PINTO & PREUSSLER (1980)]

cimento asfáltico	M_R (MPa)	σ_t (MPa)
CAP 50/60	2 700 a 4 900	0,67 a 0,96
CAP 85/100	1 900 a 3 000	0,44 a 0,71

- independentemente das faixas granulométricas dos agregados, foi possível identificar intervalos de variação de módulos de resiliência, com teores de cimento asfáltico de 4,3% a 6,5% (Tabela 2.6);

Tabela 2.6. Variação do módulo de resiliência em função do tipo de camada. [Fonte: PINTO & PREUSSLER (1980)]

cimento asfáltico	capa	“binder”
CAP 50/60	2 700 a 4 300	2 700 a 4 900
CAP 85/100	1 900 a 3 000	2 200 a 3 000

- foi observado que o teor ótimo de cimento asfáltico, determinado pelo método Marshall, corresponde na maioria dos casos, aos maiores valores de módulos de resiliência e de resistência à tração.
- a correlação entre o volume de vazios (V_v) e o módulo de resiliência foi fraca ($r = 0,50$). Embora para variação da porcentagem de vazios (2,4 a 8,6%) nas misturas ensaiadas, não se tenha constatado variação sensível no valor do módulo de resiliência, sabe-se que misturas muito abertas podem afetar significativamente a vida de serviço dos revestimentos, acelerando o processo de oxidação do cimento asfáltico.

ADEDIMILA & KENNEDY (1976) desenvolveram um estudo que teve como objetivo, entre outros, determinar o efeito de certos fatores nas características resilientes de misturas asfálticas, empregando o ensaio de tração indireta com carga dinâmica. Os fatores investigados foram tipo de agregado (rocha calcária britada e cascalho não britado de rio), teor de asfalto (4, 5, 6, 7 e 8%), temperatura de ensaio (10, 24 e 38°C) e nível de tensão aplicado (entre 5,5 e 83,0 kPa).

Os resultados obtidos indicaram que não houve diferença significativa no comportamento resiliente das misturas preparadas com os dois tipos de agregado. O efeito do teor de asfalto não ficou bem definido e, com relação à temperatura, foi verificado que o módulo de resiliência é substancialmente maior quando o ensaio é conduzido em temperaturas menores.

O efeito do nível de tensão sobre o módulo de resiliência não se mostrou significativo (ADEDIMILA & KENNEDY, 1976). SCHMIDT (1972) também apresentou resultados que indicaram que a magnitude da tensão aplicada tem pequena influên-

cia no módulo de resiliência e HOWEEDY & HERRIN (1972), empregando ensaio de compressão dinâmica a deformação constante, também indicaram que não há uma relação regular entre o módulo de resiliência e o nível de tensão.

QUEIROZ & VISSER (1978) realizaram ensaios de tração indireta com carga repetida a fim de determinar o módulo de resiliência de concretos asfálticos e tratamentos superficiais duplos, com amostras retiradas da pista, nos estados de Goiás, Minas Gerais e São Paulo e no Distrito Federal. Os ensaios foram feitos em quatro temperaturas diferentes: temperatura ambiente, 30, 35 e 40°C.

O resumo dos resultados dos ensaios de módulo de resiliência à 30°C está apresentado na Tabela 2.7. Pode-se observar que um valor médio de 2 500 MPa foi obtido, tanto para o concreto asfáltico, quanto para as misturas de tratamento superficial duplo. Quanto ao efeito da temperatura, em ambos os tipos de revestimento, existe uma redução no módulo de resiliência quando a temperatura aumenta. Na Tabela 2.8 estão apresentados os resultados dos ensaios para 20 e 30°C.

Tabela 2.7. Resumo estatístico dos resultados de módulo de resiliência, para temperatura de 30°C. [Fonte: QUEIROZ & VISSER (1978)]

tipo de revestimento	número de amostras	módulo de resiliência (MPa)		
		média	dp ⁽¹⁾	cv ⁽²⁾
concreto asfáltico	38	2 535	1 466	0,578
tratamento superficial duplo	21	2 531	1 776	0,702

⁽¹⁾dp = desvio padrão;

⁽²⁾cv = coeficiente de variação.

Tabela 2.8. Módulos de resiliência médios (MPa), para temperatura de 20 e 30°C. [Fonte: QUEIROZ & VISSER (1978)]

tipo de revestimento	temperatura do ensaio (°C)	
	20	30
concreto asfáltico	5 862	2 535
tratamento superficial duplo	5 058	2 531

BOUDREAU et al. (1992) realizaram um estudo sobre o efeito das condições de ensaio sobre a repetibilidade dos resultados do módulo de resiliência de misturas

asfálticas. Foram estudadas duas misturas com agregados diferentes, compactadas, pelo método Marshall, com dois níveis de volumes de vazios (4 e 10%) e ensaiadas sob três temperaturas diferentes: 5, 25 e 40°C. Segundo estes autores, o módulo de resiliência de misturas asfálticas é dependente de muitos fatores, incluindo o equipamento de ensaio, o operador, o método de compactação dos corpos-de-prova, a energia de compactação e também os parâmetros ou condições de ensaio, como temperatura, frequência e tempo de aplicação de carga e o nível de deformação aplicada ao corpo-de-prova. Porém, talvez a variável mais severa na variabilidade dos resultados seja a combinação das condições de ensaio escolhidas.

O objetivo desse estudo foi selecionar uma combinação de temperaturas de ensaio, frequência e tempo de aplicação de carga e deformação induzida que fornecesse resultados repetíveis, ao mesmo tempo que fosse suficientemente sensível, a ponto de detectar diferenças entre as duas misturas e os níveis de volumes de vazios de misturas similares. A tendência esperada era a de diminuição do módulo de resiliência com o aumento do volume de vazios.

A ASTM D 4123-82 (1982) recomenda as seguintes condições de ensaio para a determinação do módulo de resiliência de misturas asfálticas:

- temperatura: 5, 25 e 40°C;
- tempo de aplicação de carga: 0,1 a 0,4 s;
- frequência de aplicação de carga: 0,33; 0,50 e 1 ciclo/s;
- tensão induzida: 10 a 50% da resistência a tração.

Uma das principais conclusões do estudo de BOUDREAU et al. (1992) é que os valores do módulo de resiliência obtidos a 5°C permitem identificar a influência dos materiais sobre o comportamento das misturas, o que não é claramente verificado para a temperatura de 25°C. À temperatura de 40°C os corpos-de-prova romperam prematuramente. Ensaio adicionais indicaram que é possível notar a influência de materiais diferentes quando os valores de módulo de resiliência são obtidos sob temperaturas variando entre 5 e 25°C.

Os autores recomendam utilizar tempo de carregamento de 0,1 s, frequência de 0,33 Hz, nível de deformação entre 0,0050 e 0,0075% e temperatura de 15,6°C como condições de ensaio, quando se quer comparar dois ou mais tipos de misturas ou detec-

tar a influência da granulometria, do teor de asfalto e efeito da umidade sobre o comportamento das misturas.

TAIRA (2001) empregou o ensaio de módulo de resiliência para comparar o desempenho de uma mistura asfáltica modificada com polímero SBS (Betuflex B 65/60) com o de uma mistura convencional (CAP 20) e observou que, à temperatura de 25°C, os valores de módulo de resiliência foram menores para a mistura modificada; os resultados do ensaio para as temperaturas de 5 e 40°C não indicaram diferenças significativas de uma mistura em relação à outra.

AMARAL (2000) utilizou o ensaio de módulo de resiliência para avaliar o desempenho de misturas asfálticas modificadas com polímero SBS (Betuflex B 65/60), empregando seixo rolado como agregado graúdo, e verificou que a mistura modificada apresenta menores valores de módulo de resiliência, à temperatura de 25°C, que a mistura convencional (CAP 40). Os valores obtidos variaram de 1 550 a 2 610 MPa, para a mistura convencional e de 1 194 a 1 748 MPa, para a mistura modificada.

2.4.4. Ensaio de fluência por compressão uniaxial estática ("static creep test")

2.4.4.1. Introdução

Os ensaios de fluência uniaxial estática e dinâmica são empregados para definir a estabilidade e a suscetibilidade à deformação permanente de misturas asfálticas. Seu uso é bastante difundido por serem ensaios relativamente simples e também por causa da relação lógica existente entre o ensaio e as deformações permanentes das camadas de revestimento asfáltico (LITTLE et al., 1993).

SÁ & MOTTA (1995) comentam que o ensaio de estabilidade Marshall era, até há algum tempo, o único ensaio relacionado ao estudo da deformação permanente. Os resultados de estabilidade Marshall e fluência Marshall, entretanto, não são considerados satisfatórios. Atualmente, os ensaios de estabilidade Marshall utilizados como um meio de prever a deformação permanente das misturas de concreto asfáltico usinado a quente (CAUQ) têm sido alvo de questionamentos e críticas. Alguns ensaios mais mo-

denos estão sendo adotados, com êxito, como substitutos da estabilidade e fluência Marshall, dentre os quais destacam-se os ensaios de fluência por compressão uniaxial estática e dinâmica e os ensaios de fluência por cisalhamento.

COELHO (1996) comenta que parece haver, atualmente, uma tendência mundial que o ensaio de fluência por compressão uniaxial estática substitua o ensaio Marshall e que seu uso se propague pelos órgãos técnicos rodoviários. Porém LITTLE et al. (1993) aponta que o grande obstáculo a ser superado para o uso corrente deste método é o desenvolvimento de critérios que associem a deformação permanente fornecida pelo ensaio e o desempenho dos revestimentos asfálticos na pista.

2.4.4.2. Histórico da utilização deste método de ensaio

COELHO (1996) apresenta um breve resumo do emprego do ensaio de fluência por compressão uniaxial estática. Segundo este autor, as experiências com este método de ensaio ganharam impulso na década de 1970, tomando-se por base pesquisas realizadas no laboratório da Companhia Shell (“Koninklijke/Shell-Laboratorium”) de Amsterdã, na Holanda.

A base teórica para o ensaio de fluência por compressão uniaxial estática foi desenvolvida por HILLS (1973), que elaborou modelos teóricos para a deformação permanente das misturas asfálticas com base neste ensaio. Esta formulação está apresentada no artigo original de Hills e também foi reproduzida no trabalho de COELHO (1996).

Em 1977, o ensaio de fluência por compressão uniaxial estática foi incorporado ao Manual de Projeto de Pavimentos da Shell e no final da década de 1980, nos EUA, este ensaio foi introduzido no sistema AAMAS (“Asphalt Aggregate Mixture Analysis System”); em ambos os casos, este ensaio foi incorporado como ferramenta para a avaliação de misturas asfálticas quanto à capacidade de resistir à deformação permanente. MAHBOUB & LITTLE (1990) divulgaram o método de projeto de misturas asfálticas desenvolvido pelo Departamento de Rodovias e Transporte Público do Estado do Texas (“Texas State Department of Highway and Public Transportation”), nos EUA, no qual também é empregado o ensaio de fluência por compressão uniaxial estática para a avaliação da resistência das misturas asfálticas à deformação permanente.

2.4.4.3. O mecanismo das deformações no ensaio de fluência por compressão uniaxial

Uma representação esquemática da influência do nível de tensão sobre a fluência, num tempo qualquer após aplicação de carga, é apresentado na Figura 2.3 (LITTLE et al., 1993). Para tensões pequenas, as taxas de fluência são pequenas e praticamente desprezíveis. Para uma certa faixa de tensões, uma relação aproximadamente linear entre o logaritmo da taxa de deformação e a tensão pode ser estabelecida. Quando a tensão aplicada se aproxima da máxima tensão que o material pode suportar, a taxa de deformação se torna maior, iniciando-se o trecho de colapso.

A Figura 2.3 indica também que, aparentemente, sob a aplicação de tensão durante um intervalo de tempo, a resposta de um material em específico, como, por exemplo, uma mistura asfáltica, não é necessariamente linear. Se a taxa de tensão aplicada é tal que provoca deformações próximas à região de colapso, ilustrada na Figura 2.3, não é apropriada a consideração do comportamento linear.

Figura 2.3. Influência da intensidade da tensão sobre a taxa de fluência. [Adaptado de LITTLE et al. (1993)]

Este fato é bastante importante, uma vez que, no passado, admitia-se que o comportamento de uma mistura asfáltica sob a ação das cargas seria viscoelástico-linear.

Tal consideração é conveniente, pois os resultados de laboratório, para níveis de tensão relativamente baixos, poderiam ser simplesmente transferidos para níveis de tensão maiores, no campo, pelo princípio da superposição viscoelástico-linear. Porém, isto é visivelmente incorreto quando se observa a região não linear superior da Figura 2.3. O autor conclui ser essencial a escolha correta do nível de tensões a ser aplicado nos ensaios no laboratório.

Segundo LITTLE et al. (1993), ainda, uma outra forma generalizada para ilustrar os vários estágios da fluência é mostrado na Figura 2.4. Aqui, a fluência para um determinado nível de tensão é representada graficamente em função do tempo e a deformação é dividida em três trechos. No primeiro trecho, denominado estágio primário ou inicial, a taxa de deformação aumenta rapidamente. Na segunda parte, chamada trecho uniforme, a taxa de deformação é aproximadamente constante. E a terceira região corresponde ao estágio terciário ou trecho de colapso, no qual a deformação aumenta rapidamente outra vez.

Figura 2.4. Estágios da fluência. [Adaptado de LITTLE et al. (1993)]

A relação entre a fluência e o logaritmo do tempo pode ser linear ou côncava ou convexa. A relação linear é normalmente adotada nas aplicações da engenharia por questões de simplificação na análise. Mesmo sem o benefício de uma correlação entre os resultados do ensaio de fluência e o desempenho de campo, é evidente que uma

mistura estável e resistente à deformação permanente não deveria apresentar o estágio terciário de fluência, se ensaiada em laboratório sob condições de tensão e temperatura que simulem as condições da mistura na pista (LITTLE et al., 1993).

A deformação total, após o período de carregamento, por exemplo, 3 600 s, é freqüentemente usada para dizer se uma mistura é aceitável ou não no ensaio de fluência uniaxial. A tensão aplicada ao corpo-de-prova, dividida por esta deformação, fornece o valor do módulo de fluência. Essa abordagem é usada no sistema AAMAS, para definir o módulo de fluência mínimo para 3 600 s de carregamento.

Segundo LITTLE et al. (1993), parece mais apropriado usar apenas a deformação irreversível (viscoplástica) no cálculo do módulo de fluência, uma vez que apenas esta porção da deformação é importante na avaliação da resistência da mistura à deformação permanente. Na prática, o módulo de fluência, ao longo do tempo de carregamento, é bastante influenciado pela resposta viscosa (não recuperável) do cimento asfáltico. A porção elástica da rigidez do cimento asfáltico, no decorrer desse longo intervalo de tempo e sob as temperaturas relativamente altas sob as quais o ensaio é tipicamente realizado, é praticamente desprezível e a parcela viscosa é predominante.

Segundo LITTLE et al. (1993), não é este o caso, contudo, quando os efeitos do agregado mineral são considerados. A elasticidade oferecida pela matriz de agregado deveria ser considerada, se possível, para avaliar o efeito dela sobre a resistência à deformação permanente da mistura asfáltica. Provavelmente, a maneira mais fácil de avaliar a influência da matriz de agregados sobre a recuperação elástica da mistura é por meio de um ensaio de recuperação, imediatamente após o período de carregamento.

Além das informações sobre a deformação total ou do módulo de fluência final e o conhecimento da porcentagem de deformação recuperável ao final do período de ensaio, é importante definir a taxa de fluência. Ensaio de fluência em misturas asfálticas demonstram que a taxa de fluência e a forma da curva de fluência são difíceis de prever. Contudo, a seguinte tendência geral é usualmente observada: a taxa de fluência depende do tempo de carregamento, temperatura, nível de tensão, tipo de mistura e outros parâmetros como o processo de aplicação de carga.

Com a consolidação, ocorre a diminuição do volume de vazios da mistura e gradualmente a tensão é transferida para os contatos entre as partículas de agregado mineral. A taxa de deformação diminui quando isto ocorre. Portanto, uma taxa de deformação constante e positiva indica um estado instável entre as forças externas e a resistência interna do material. Este tipo de resposta irá resultar em colapso. Durante o

colapso, a taxa de deformação aumenta rapidamente e a curva se torna côncava, conforme Figura 2.4.

Segundo MAHBOUB (1990), nos materiais viscoelásticos, na maior parte das vezes, os carregamentos estáticos provocam deformações mais pronunciadas do que as formadas pela aplicação de carregamentos dinâmicos.

2.4.4.4. Critérios para a avaliação dos resultados do ensaio de fluência por compressão axial estática

MAHBOUB & LITTLE (1988)¹⁹ apud LITTLE et al. (1993) desenvolveram um método de análise dos resultados do ensaio de fluência por compressão uniaxial estática, adotado no programa AAMAS. Este método utiliza a equação 2.3 ($\epsilon_{vp} = at^b$) para determinar a deformação não recuperável, ϵ_{vp} . O ensaio de fluência estática, no programa AAMAS, utiliza tempos de carregamento e de recuperação de 3 600 s, temperatura de 40°C e tensão aplicada aproximadamente igual à tensão vertical de compressão média nas camadas do pavimento.

LITTLE et al. (1993) citam outros pesquisadores que desenvolveram critérios para a avaliação dos resultados do ensaio de fluência por compressão uniaxial estática, com base nos resultados do módulo de fluência. Por exemplo, VILJOEN & MEADOWS (1981)²⁰ indicam que o módulo de fluência mínimo para prevenir a formação de deformação permanente é 82,7 MPa, no ensaio com tempo de carregamento de 100 min, a 40°C, sob tensão de 0,207 MPa. KHEDR (1986)²¹ diz que o módulo de fluência após 60 min de carregamento, a 40°C, sob tensão de 0,207 MPa, deveria ser, no

¹⁹MAHBOUB, K.; LITTLE, D. N. (1988). Improved asphalt concrete mixture design. *Research Report 2474-1F*, Texas Transportation Institute.

²⁰VILJOEN, A. W.; MEADOWS, K. The creep test – a mix design tool to rank asphalt mixes in terms of their resistance to permanent deformation under heavy traffic. *National Institute of Road Research*, Pretoria, África do Sul, 1981.

²¹KHEDR, S. A. Deformation mechanism in asphaltic concrete. *Journal of Transportation*, ASCE, v. 112, 1986.

mínimo, 137,9 MPa. KRONFUSS et al. (1984)²² sugerem os valores de módulo de fluência apresentados na Tabela 2.9, para tensão de 0,103 MPa, a uma temperatura de 40°C e tempo de carregamento de 60 min.

Tabela 2.9. Valores mínimos do módulo de fluência segundo KRONFUSS et al. (1984) apud LITTLE et al. (1993).

intensidade do tráfego	faixa de valores aceitáveis do módulo de fluência (MPa)
baixa	20,7 ou acima
moderada	20,7 a 31,0
alta	31,0 a 45,3

Estes pesquisadores também estabeleceram um limite superior para a rigidez à fluência de 46,5 MPa, à 40°C, considerando que uma rigidez superior àquela por eles determinada seria alta demais e sujeitaria a camada asfáltica à fissuração por fadiga ou efeitos térmicos. Porém, segundo LITTLE et al. (1993), este limite superior foi definido para os climas mais frios da Europa, nos quais os efeitos de fissuração devido às baixas temperaturas precisam ser considerados de forma diferente em relação às regiões do sul dos Estados Unidos.

LITTLE et al. (1993) também citam um amplo estudo realizado por SOUZA et al. (1991)²³, considerando a influência do tipo e do teor de cimento asfáltico, do tipo de agregado, do volume de vazios, da temperatura de compactação e do nível de tensões sobre os resultados do ensaio de fluência por compressão uniaxial estática. Os resultados deste estudo indicam que este ensaio é sensível a todas estas variáveis e parece ser um recurso racional, seguro e adequado para avaliar o potencial das misturas asfálticas em apresentar um desempenho satisfatório no pavimento.

²²KRONFUSS, R.; KRZEMIEN, R.; NIEVELT, G.; PUTZ, P. Verformungsfestigkeit von asphalten ermittlung in Kriechtest. *Bundesministerium fur Bauten and Technik, Strassenforschung*, Heft 240, Wien, Austria, 1984.

²³SOUZA, J. B.; HARVEY, J.; PAINTER, L.; DEACON, J. A.; MONISMITH, C. L. (1991). Evaluation of laboratory procedures for compacting asphalt aggregate mixtures. *Institute of Transportation Studies*, University of California.

Neste estudo, SOUZA et al. (1991)²³ apud LITTLE et al. (1993) apontam que os valores de módulo de fluência, calculados com carregamento de 3 600 s e tensão de 0,207 MPa, apresentam grande sensibilidade ao nível de cada uma das variáveis mencionadas anteriormente. O módulo de fluência obtido ao nível máximo de cada variável (condições mais deletérias) variou de 62,7 a 6,9 MPa, ao passo que variou, nas condições menos deletérias, de 227,5 a 69,0 MPa.

LITTLE et al. (1993) concluem, com base nos dados apresentados anteriormente, que valores de módulo de fluência maiores que 69,0 MPa, após um determinado período de carregamento, representativo das condições que a camada asfáltica está submetida na pista, são um indicativo de baixa sensibilidade à formação de deformação permanente. Por outro lado, valores críticos, indicando nível de moderado a alto de sensibilidade à formação de deformação permanente, estão na faixa de 41,4 a 6,9 MPa.

O Instituto de Transportes do Texas desenvolveu um critério, apresentado em LITTLE et al. (1993), para a avaliação dos resultados do ensaio de fluência por compressão uniaxial estática, visando o estudo das misturas asfálticas quanto à resistência à deformação permanente. Os parâmetros empregados nessa avaliação são: a declividade do trecho reto da curva de fluência e as deformações total, recuperável e não recuperável, após 60 min de atuação do carregamento. As Tabelas 2.10 e 2.11, a seguir, apresentam um resumo deste critério. A Tabela 2.10 apresenta os parâmetros da curva de fluência requeridos de uma mistura asfáltica resistente à deformação permanente. A Tabela 2.11 apresenta valores mínimos do módulo de fluência para diferentes níveis de tensão e de intensidade de tráfego.

Tabela 2.10. Critério para a avaliação de misturas asfálticas, com base na deformação permanente total e declividade do trecho reto da curva de fluência.[Fonte: LITTLE et al. (1993)]

deformação total (%) após 1 h de carregamento (ϵ_{vp})	declividade “b” do trecho reto da curva de fluência					
	< 0,17	< 0,20	< 0,25	< 0,30	< 0,35	< 0,40
< 0,25	IV ²	IV ²	IV ²	IV ²	IV ²	III
< 0,40	IV ²	IV ²	IV ²	III ²	III ²	III ²
< 0,50	IV ²	IV ²	III ²	III ²	III ²	II
< 0,80	III ²	III ²	II	II	II	II
< 1,00	I	I	I	I	I ¹	
< 1,20	I ¹	I ¹	I ¹			

Notas:

I – tráfego de baixa intensidade: menor que 10^5 solicitações equivalentes do eixo padrão de 8,2 t;

II – tráfego de intensidade moderada: entre 10^5 e 5.10^5 solicitações equivalentes do eixo padrão de 8,2 t;

III – tráfego de alta intensidade: entre 5.10^5 e 10^6 solicitações equivalentes do eixo padrão de 8,2 t;

IV – tráfego de intensidade muito alta: mais que 10^6 solicitações equivalentes do eixo padrão de 8,2 t.

¹ Deve-se ter também $\epsilon_{vp} < 0,80\%$ após 1 800 s de carregamento.

² Deveria também atender o critério apresentado na equação 2.17 (pág. 50).

Tabela 2.11. Critério para a avaliação de misturas asfálticas com base no módulo de fluência. [Fonte: LITTLE et al. (1993)]

nível de resistência à formação de deformação permanente	nível de intensidade do tráfego	módulo de fluência mínimo requerido, em MPa, para níveis de tensão de:		
		207 KPa	345 KPa	483 KPa
alto	IV	103,4	120,7	155,1
	III	48,3	69,0	96,5
	II	34,5	44,8	60,3
	I	20,7	27,6	41,4
moderado	IV	51,7	69,0	96,5
	III	34,5	50,0	69,0
	II	24,1	41,4	51,7
	I	17,2	20,7	27,6

O atual critério adotado pelo Instituto de Transportes do Texas para avaliar a resistência à deformação permanente em uma mistura asfáltica possui, em linhas gerais, o procedimento apresentado a seguir:

- determinar a intensidade de tráfego da rodovia na qual a mistura será empregada. A intensidade de tráfego é definida como o número de solicitações equivalentes do eixo padrão de 8,2 t obtida durante os 180 dias mais quentes do ano;

- fazer um levantamento da estrutura do pavimento e com base nisto consultar uma tabela adequada (p. ex. LITTLE & YOUSSEF, 1992)²⁴ para determinar o nível de tensão normal sob a qual os corpos-de-prova serão ensaiados;
- realizar o ensaio de fluência por compressão uniaxial estática com tempo de carregamento de 1 h à temperatura de 40°C, de acordo com procedimento apresentado a seguir, no item 2.2.4.5;
- efetuar a medida das deformações durante a 1 h de carregamento, com pelo menos uma medida a cada 100 s, e traçar a curva de fluência, a fim de identificar se o estágio de colapso é atingido durante o ensaio;
- determinar o trecho reto da curva de fluência, aproximadamente entre 1 000 e 3 600 s;
- calcular a declividade média “b” do trecho reto da curva de fluência no intervalo acima, a deformação permanente (ϵ_{vp}) e o módulo de fluência (M_F), conforme equação abaixo:

$$M_F = \frac{\sigma}{\epsilon_{vp}} \quad (2.16)$$

onde σ é a tensão aplicada ao corpo-de-prova durante o ensaio. Entrar nas Tabelas 2.10 e 2.11 e determinar para quais níveis de tráfego a mistura é aceitável. Se a mistura não é adequada para o nível de tráfego pretendido, alterar sua composição mediante alterações nas porcentagens e/ou características dos agregados e/ou do cimento asfáltico;

- verificar um critério adicional, apontado pelo sistema AAMAS, que sugere que o somatório da deformação permanente (ϵ_{vp}), medida ao final do período de carregamento no ensaio de fluência, e da deformação elástica total (ϵ_r), medida no ensaio de resiliência (“uniaxial resilient modulus test”), não deveria exceder aproximadamente 50% da deformação (ϵ_{qu}) determinada no ensaio de compressão não confinada (“unconfined compression test”), con-

²⁴LITTLE, D. N.; YOUSSEF, H. (1992). Improved asphalt concrete mixture design procedure: validation and implementation. Report 1170-1F. *Texas Transportation Institute*.

forme ASTM T 167. A deformação recuperável total “ ϵ_r ” deve ser medida a uma frequência de aplicação de carga de 1 ciclo por segundo, isto é, intervalo de aplicação de carga de 0,1 s de duração, seguido de um intervalo de 0,9 s de recuperação ou repouso. Matematicamente, este critério é escrito da seguinte forma:

$$\epsilon_{vp} + \epsilon_r < 0,5\epsilon_{qu} \quad (2.17)$$

2.4.4.5. O ensaio de fluência por compressão uniaxial estática

Consiste, basicamente, na aplicação de uma carga de compressão estática e contínua em corpos-de-prova cilíndricos, ao longo do tempo, sob temperatura constante. Este tempo pode ser de um hora ou até o colapso do corpo-de-prova. Devido a esta aplicação de carga estática, o corpo-de-prova vai se deformando até romper ou estabilizar. Usualmente, mede-se esta deformação axial viscosa em função do tempo de carregamento e traça-se um gráfico de fluência do material.

Segundo LITTLE et al. (1993), o ensaio de fluência por compressão uniaxial estática é normalmente efetuado a uma temperatura de 40°C. Estes autores argumentam que existe já um vasto histórico do emprego desta temperatura de ensaio, além de ser também a temperatura adotada pelo sistema AAMAS. Segundo este autor, ainda, esta temperatura de ensaio é adequada quando se considera os perfis de temperatura nos pavimentos sob as condições climáticas características do sul dos Estados Unidos.

Quanto ao tempo de carregamento, LITTLE et al. (1993) dizem que o período de carregamento de 3 600 s é bastante usual, talvez por ser razoavelmente longo a ponto de refletir as condições de carregamento durante as quais ocorrem as deformações permanentes no pavimento, além de ser suficientemente curto para ser exequível.

SÁ & MOTTA (1995) utilizaram, nas pesquisas realizadas, tempo de carregamento de uma hora, sob justificativa de que, após este período, as deformações ocorrem muito lentamente, tendendo a se estabilizar. Esta conclusão foi obtida com base em resultados de alguns corpos-de-prova que receberam carregamento por um intervalo de tempo superior a 60 min. Já no caso de carregamento dinâmico, concluíram, após ob-

servar os resultados de alguns corpos-de-prova que receberam carregamento por mais de uma hora (mais de 3 600 golpes), que, diferentemente do que ocorreu com os ensaios estáticos, após uma hora de ensaio ainda ocorreram deformações significativas.

O equipamento inicialmente empregado na realização do ensaio de fluência por compressão uniaxial estática é o mesmo empregado nos ensaios de adensamento de solos. Ainda hoje este equipamento é largamente utilizado, por ser de operação simples e por fornecer bons resultados.

Estão disponíveis, atualmente, equipamentos mais sofisticados, como aqueles utilizados na realização de ensaio de fluência por compressão uniaxial dinâmica, dotados de medidores tipo LVDT, que permitem a medição e o registro eletrônico das leituras de carga e deformação, facilitando a operação dos ensaios e o posterior processamento dos resultados.

O procedimento, em termos gerais, para a realização deste ensaio é:

- condicionamento térmico dos corpos-de-prova, na temperatura prevista para o ensaio, durante um período mínimo de 6 h;
- condicionamento inicial do corpo-de-prova, mediante a aplicação, durante 2 min, de carga de ensaio, seguido de um período de 5 min de “descanso” ou recuperação do corpo-de-prova;
- imediatamente após o período de recuperação, inicia-se o ensaio com a aplicação da carga por 60 min; durante esse período, as deformações axiais vão sendo medidas em intervalos de 30 s, nos primeiros 5 min, em seguida a cada 1 min até completar 30 min de ensaio e a cada 5 min na segunda metade do período de carregamento;
- em seguida, a carga de ensaio é retirada e, durante os 15 min seguintes, correspondentes ao período de recuperação, são realizadas leituras de deformação axial, a cada 30 s nos 5 primeiros minutos e a cada 1 min nos dez restantes;
- as deformações axiais específicas (ε) são calculada por:

$$\varepsilon = \frac{\Delta h}{h_0} \quad (2.16)$$

onde: Δh = variação da altura do corpo-de-prova;

h_0 = altura inicial do corpo-de-prova, em mm, tomada na direção do carregamento.

- com os resultados obtidos, traça-se a curva de fluência do material e/ou calculam-se os parâmetros para análise da mistura.

2.4.4.6. Determinação do nível apropriado de tensão no ensaio de fluência por compressão uniaxial estática

LITTLE et al. (1993) comenta que a maioria dos ensaios de fluência estática registrados na literatura é realizada sob tensões baixas, por exemplo, em torno de 0,1 MPa, ou mesmo inferiores. A principal justificativa para manter estes níveis de tensão tão baixos é gerar dados de deformação que possam ser tratados empregando a teoria da viscoelasticidade linear. Contudo, níveis de tensão dessa magnitude são muito baixos para representar as condições de tensão às quais um pavimento está submetido em serviço. Uma mistura asfáltica não apresenta comportamento viscoelástico-linear acima do ponto de colapso; sua resposta é não linear e, portanto, um ensaio de avaliação de uma mistura deve considerar a ocorrência deste comportamento, o que exige a escolha de níveis apropriados de tensão.

Segundo MAHBOUB & LITTLE (1988) apud LITTLE et al. (1993), as tensões verticais de compressão nas camadas do pavimento normalmente variam de 65 a 86% da tensão média de contato entre o pneu e a superfície do pavimento. Os pneus de caminhões, hoje, segundo estes autores, empregam pressões de enchimento superiores a 1,034 MPa ou 150 psi (aproximadamente 10 kgf/cm²).

LITTLE et al. (1993) sugerem o emprego de uma tensão entre 0,345 e 0,415 MPa. EL HUSSEIN & YUE (1994) dizem que a tensão de 0,69 MPa reproduz apropriadamente a pressão de enchimento de veículos comerciais nos Estados Unidos. Em estudos realizados por estes últimos autores, em ensaios de fluência por compressão uniaxial dinâmica foram utilizadas tensões variando de 0,345 a 1,034 MPa (50 a 150 psi).

2.4.4.7. Méritos e limitações dos ensaios de fluência por compressão uniaxial estática

Os principais méritos do ensaio de fluência por compressão uniaxial estática são a simplicidade operacional e dos equipamentos exigidos para a sua realização. Segundo COELHO (1996), outro fator positivo é a boa consistência entre os resultados deste ensaio e os resultados do ensaio de trilha de roda, o que favorece a adoção do ensaio de “creep” estático para a avaliação da estabilidade mecânica das misturas asfálticas.

COELHO (1996) aponta também que o ensaio de fluência por compressão uniaxial estática apresenta algumas limitações, por se tratar de um método de ensaio empírico, na medida em que não simula, em laboratório, as verdadeiras condições de tensão que ocorrem com os materiais no campo. Outro fator limitante está relacionado à dificuldade na obtenção de corpos-de-prova mais adequados à realização do ensaio, como, por exemplo, corpos-de-prova de forma cilíndrica ou prismática extraídos de placas compactadas.

TAIRA (2001) realizou ensaios de fluência estática e dinâmica, em dois tipos diferentes de concretos asfálticos, um modificado com polímero SBS (Betuflex B 65/60) e outro convencional, e verificou que os ensaios estáticos não forneceram uma diferenciação clara de comportamento de uma mistura em relação à outra. Já os ensaios de fluência dinâmica indicaram que as misturas com asfalto modificado apresentaram, de maneira geral, um desempenho superior em relação à mistura convencional.

3. BORRACHA DE PNEUS: USO EM PAVIMENTAÇÃO ASFÁLTICA

3.1. Introdução

O tema da reciclagem de produtos descartados está ganhando vulto em âmbito mundial, especialmente com a crescente preocupação dos governos, das empresas e dos cidadãos de um modo geral com as questões ambientais. Quanto aos pneus inservíveis, especificamente, existem várias formas de reciclagem. Uma delas, o emprego em pavimentação asfáltica, vem sendo estudada desde a década de 1960 nos Estados Unidos e desde a década de 1990 no Brasil.

A borracha de pneu pode ser empregada, em associação com outros materiais, na produção de tapetes para automóveis e banheiros, capachos, pisos antiderrapantes, adesivos, cestos de lixo, correias transportadoras, solas de sapato e outros produtos. Os pneus descartados podem também ser aproveitados, em conjunto com o xisto betuminoso, na produção de óleo e gás, por meio do processo desenvolvido pela Petrobras de São Mateus do Sul, PR, que também dá origem ao óleo extensor AR-5 empregado neste estudo. Por este processo, podem ser recicladas 140 mil toneladas de pneus descartados por ano, o equivalente a 27 milhões de unidades.

A recauchutagem é outro importante meio para o aumento da vida útil dos pneus e conseqüente redução do número de pneus descartados. Porém, a maioria deles, quando desgastada pelo uso e imprestável para outras recauchutagens, também é jogada no lixo.

A incorporação de borracha moída ao cimento asfáltico dá origem ao chamado "ligante asfalto-borracha". Inicialmente, o ligante asfalto-borracha foi de-

envolvido para ser usado em atividades de manutenção e reabilitação de pavimentos e para tentar prolongar a vida útil destes, sendo aplicado na execução de remendos e também como selante de trincas e juntas. Desde então, este produto passou a ser utilizado em tratamentos superficiais, na transição entre o pavimento existente e a camada de reforço e em revestimento de concreto asfáltico.

Diversos estudos realizados nos Estados Unidos envolvendo o uso de asfalto-borracha em misturas asfálticas, em substituição ao cimento asfáltico convencional, indicam o aumento da resistência à fadiga, da resistência à derrapagem e da durabilidade, bem como o retardamento de trincas por reflexão (TAKALLOU & SAINTON, 1992). Além da melhoria destas características, outros estudos indicam ainda maior resistência ao acúmulo de deformação permanente e à ação da água e diminuição do módulo de resiliência.

Segundo McQUILLEN et al. (1988), as principais vantagens do uso de borracha de pneus descartados em misturas asfálticas incluem aumento da durabilidade e flexibilidade das camadas asfálticas, além de reduzir o ruído do tráfego e contribuir para a diminuição do acúmulo de pneus descartados. A principal desvantagem é o acréscimo nos custos de produção das misturas e execução das camadas asfálticas em relação às misturas convencionais.

Além da aplicação em pavimentação, os pneus descartados também podem ter outras aplicações em Engenharia Civil, como, por exemplo, em obras de contenções, na construção de quebra-mares, na construção de parques infantis, no controle de erosões, na drenagem de gases em aterros sanitários e outros. No Brasil, são aplicados também em estruturas de recifes artificiais no mar, visando o aumento da produção pesqueira (ODA, 2000).

3.2. Aspectos gerais do uso de borracha de pneu em pavimentação asfáltica

3.2.1. Histórico

O conceito da mistura de borracha ao cimento asfáltico é antigo. Tentativas do uso de borracha de pneus descartados em pavimentação foram feitas a partir de

1920. Durante muitos anos, engenheiros e químicos trabalharam misturando borracha natural e borracha sintética em cimentos asfálticos na tentativa de melhorar suas propriedades elásticas. Porém, a história oficial da adição de borracha de pneu em materiais para pavimentação asfáltica teve início na década de 1940. A Companhia de Reciclagem de Borracha (“U. S. Rubber Reclaiming Company”) introduziu no mercado, nesta época, um produto composto de material asfáltico e borracha desvulcanizada reciclada, denominado “Ramflex”.

Em 1963, o Engenheiro de Materiais Charles H. McDonald, considerado o pai do ligante asfalto-borracha nos Estados Unidos, iniciou estudos visando o emprego da borracha de pneu na criação de um material altamente plástico para ser aplicado na manutenção de pavimentos asfálticos. O resultado desta pesquisa foi o desenvolvimento de um produto composto de cimento asfáltico e 25% de borracha moída de pneu (com partículas de 0,6 a 1,2 mm), misturados a temperatura de 190°C, durante 20 min, para ser utilizado em remendos e também como selante de juntas e em camadas de reforço (SAMI – “stress absorbing membrane interlayer”¹).

Em 1968, o Departamento de Transportes do Arizona construiu o primeiro pavimento usando o sistema SAM (“stress absorbing membrane”¹) e, em 1971, um trecho experimental de 21 km, no qual foi adicionado querosene ao asfalto-borracha para facilitar sua aplicação. Em 1972, este Departamento executou o primeiro trecho utilizando o sistema SAMI e a primeira experiência com CAUQ em camada de revestimento foi feita em 1975.

Na Europa, as pesquisas sobre a incorporação de borracha ao cimento asfáltico também começaram na década de 1960. Na França, a incorporação de borracha ao cimento asfáltico foi iniciada em 1981, pela empresa Beugnet. No processo desenvolvido por esta empresa, a borracha moída era adicionada ao cimento asfáltico à temperatura de 200°C, empregando óleo extensor. A proporção de borracha utilizada variava de 10 a 30% e a de óleo extensor entre 3 a 15% sobre o peso do cimento asfáltico. O produto obtido por este processo é denominado “Flexochape”.

Uma das principais agências a contribuir para o desenvolvimento da tecnologia do asfalto-borracha, nos Estados Unidos, foi o FHWA (“Federal Highway Administration”), que desde o início da década de 1970 desenvolve pesquisas na área.

¹Ver detalhes na seção 3.2.4, pág. 61.

Um dos primeiros trabalhos encontrados na literatura sobre o emprego do asfalto-borracha como ligante em concreto asfáltico é o de Jimenez, publicado em 1979 como relatório do FHWA, e posteriormente (JIMENEZ, 1982) na revista TRR ("Transportation Research Record"), do TRB ("Transportation Research Board").

Em 1991, foi criada, nos Estados Unidos, a Lei sobre a Eficiência do Transporte Intermodal de Superfície (ISTEA), estabelecendo o uso mínimo de borracha de pneu a ser empregado em pavimentação asfáltica, como uma tentativa de diminuir o problema ambiental provocado pelos pneus descartados. A partir de então, as agências de transportes estaduais, nos Estados Unidos, intensificaram os estudos sobre a incorporação de borracha de pneus descartados em pavimentação asfáltica.

No Brasil, desde o início da década de 1990, alguns centros de pesquisa e universidades estão desenvolvendo pesquisas sobre o emprego de borracha de pneus descartados em pavimentação asfáltica, especialmente sobre o ligante asfalto-borracha. Porém, pouco foi feito até o presente momento quanto ao estudo do desempenho de CAUQ modificado com borracha, seja em laboratório ou em trechos experimentais.

A primeira experiência brasileira da aplicação do ligante asfalto-borracha em pavimentação asfáltica é relatada por RUWER et al. (2001); trata-se da execução de um recapeamento da rodovia BR 116, RS, empregando uma mistura composta por CAP 20 e borracha.

Em 1999, entrou em vigor a resolução nº 258 do CONAMA, exigindo que, a partir de 2002, as indústrias de pneumáticos se responsabilizem pelo destino final dos pneus inservíveis. Esta regulamentação provavelmente irá motivar o desenvolvimento de novos estudos da reciclagem de pneus em pavimentação bem como em outras áreas.

3.2.2. Terminologia

A incorporação da borracha de pneus descartados às misturas asfálticas pode ser feita de duas formas distintas: processo seco e processo úmido. O termo "processo seco" define os métodos que misturam a borracha com o agregado mineral antes da adição do cimento asfáltico. O termo "processo úmido" define os métodos de mistura da borracha moída com o cimento asfáltico antes da adição do agregado mineral.

O processo seco é limitado à aplicação em concreto asfáltico, ao passo que o processo úmido é empregado em selagem de trincas, tratamentos superficiais, camadas de ligação e concreto asfáltico (ver Fig. 3.1). O processo seco permite um período restrito de reação entre o cimento asfáltico e a borracha e o processo úmido pode permitir a reação completa entre o cimento asfáltico e o pó de borracha, dependendo de condições como temperatura, tempo de mistura e a presença ou não de óleo extensor.

A quantidade de borracha incorporada ao cimento asfáltico pelo processo úmido varia de 5 a 25% sobre a porcentagem de cimento asfáltico, geralmente com partículas inferiores a 2,00 mm. A reação entre a borracha e o cimento asfáltico deve ocorrer a temperaturas elevadas, geralmente na faixa de 150 a 200°C, durante um determinado período de tempo, que pode variar de 20 a 120 min.

O processo seco emprega de 3 a 5%, em relação à massa total de agregados minerais, de partículas de borracha variando de 1,6 a 6,4 mm. Normalmente utilizam-se agregados minerais de granulometria descontínua ou aberta, a fim de acomodar a borracha. A quantidade de borracha empregada neste processo chega a ser de 2 a 4 vezes maior que a incorporada pelo processo úmido.

É importante também distinguir os processos dos produtos finais. Quando a borracha moída é incorporada pelo processo seco, o produto obtido é chamado de agregado borracha. O cimento asfáltico modificado é denominado asfalto-borracha. A Figura 3.1 traz um resumo da terminologia normalmente empregada. As aplicações de ambos os produtos em pavimentação asfáltica estão detalhadas a seguir, no item 3.2.4.

Figura 3.1. Terminologia.

3.2.3. Meio ambiente e legislação

A partir do início da década de 1990, aumentou a preocupação dos órgãos ambientais e governamentais dos Estados Unidos com a destinação dos pneus descartados. Em 1991, a Lei sobre a Eficiência do Transporte Intermodal de Superfície (ISTEA), nos Estados Unidos, estabeleceu o uso mínimo de borracha de pneu a ser empregada em pavimentação asfáltica como uma tentativa de diminuir o problema ambiental provocado pelos pneus inservíveis. A partir de então, vários departamentos de transporte norte-americanos passaram a desenvolver estudos sobre o ligante asfalto-borracha e o desempenho das misturas que o utilizam (AYRES & WITCZAK, 1995).

A ISTEA (ver Apêndice B) estabelece a porcentagem mínima de borracha de pneu a ser adicionada às misturas asfálticas, em relação ao volume total de misturas produzidas anualmente: 5% no ano de 1994, 10% no ano de 1995, 15% no ano de 1996 e 20% no ano de 1997 e nos seguintes. Segundo BROWN et al. (1997), em um esforço para diminuir a quantidade de pneus descartados nos Estados Unidos, que representa um passivo ambiental de 2 bilhões com expectativa de aumento de aproximadamente 285 milhões ao ano, o Congresso Americano incluiu alguns adendos à ISTEA, de 1991, para reter fundos federais para os Estados que não incorporarem borracha de pneus descartados em misturas asfálticas.

Segundo HEITZMAN (1992), as agências rodoviárias dos Estados Unidos, após a criação da ISTEA, começaram a estabelecer leis para o controle dos pneus descartados. As disposições típicas das legislações estaduais incluem regulamentações quanto ao controle do processamento e estocagem de pneus descartados, restrições da quantidade de pneus em aterros sanitários, cobrança de taxas pela disposição dos pneus e incentivos ao desenvolvimento de mercados alternativos para os pneus descartados.

O Departamento de Transportes do Estado da Flórida, nos Estados Unidos, após as primeiras conclusões de um extenso estudo de campo sobre o desempenho de misturas asfálticas modificadas com borracha, iniciou a implementação de especificações exigindo o uso de borracha de pneu em todas as misturas empregadas em revestimentos asfálticos. Desde a implantação destas especificações, em 1994, até 1999, mais de 2,7 milhões de toneladas de misturas asfálticas modificadas com borracha foram empregadas na execução de pavimentos naquele Estado (CHOUBANE et al., 1999).

A quantidade de pneus descartados anualmente no estado da Flórida, segundo CHOUBANE et al. (1999), chega a 12 milhões e estima-se que o emprego de borracha em misturas asfálticas irá consumir pelo menos um quinto desta quantidade. O incremento estimado nos custos de produção de misturas asfálticas naquele Estado é de 10 a 15%. As especificações exigem que a borracha seja triturada por meio de um processo que ocorra à temperatura ambiente e que a incorporação da borracha às misturas asfálticas seja feita pelo processo úmido.

De modo geral, é possível incorporar a borracha de 2 a 6 pneus em uma tonelada de concreto asfáltico. Para reciclar anualmente 10 milhões de pneus descartados, seria necessário produzir de 2 a 5 milhões de toneladas de concreto asfáltico modificado com borracha (HEITZMAN, 1992).

No Brasil, a Resolução nº 258 do CONAMA, publicada em 1999, determina que fabricantes e comerciantes de pneus serão responsabilizados pelo destino dos pneus descartados. O passivo ambiental do Brasil chega a 900 milhões de pneus, ao qual devem-se somar os ainda em uso pelos mais de 18 milhões de veículos que trafegam no país (SCHARF, 1999; ROCHA FILHO, 2001).

Segundo esta resolução, a partir de 2002, a cada quatro pneus comercializados, um terá de ser reciclado ou destruído; a partir de 2003, a taxa de pneus reciclados sobe para um a cada dois comercializados; em 2004, a proporção será de um para um. A esta altura, segundo TOMMASINI (2000), estará sendo reciclada toda a produção destinada ao mercado interno, isto é, o total da produção nacional, atualmente em torno de 41 milhões de unidades, a menos das exportações, que hoje respondem por 35% deste volume. Finalmente, a partir de 2005, para cada quatro pneus novos, cinco terão que ser reciclados, de modo a eliminar os depósitos hoje existentes.

A Associação Nacional de Indústrias de Pneumáticos (ANIP), segundo ODA (2000) estima que, no Brasil, pelo menos 50% dos pneus produzidos anualmente estão sendo descartados e dispostos em locais inadequados.

3.2.4. Aplicações do ligante asfalto-borracha

As aplicações do ligante asfalto-borracha em pavimentação são:

- selante de trincas e juntas;

- tratamento superficial (“cheap seal”);
- membranas de absorção de tensões (SAM – “Stress Absorbing Membrane”) e membranas intercamadas de absorção de tensões (SAMI – “Stress Absorbing Membrane Interlayer”);
- concreto asfáltico usinado a quente.

Inicialmente, o ligante asfalto-borracha foi empregado em atividades de manutenção e reabilitação de pavimentos, como selante de juntas e trincas, sendo recomendado tanto para pavimentos de concreto asfáltico quanto de concreto de cimento Portland. Segundo ESTAKHRI et al. (1992), comparando-se a vida útil de selantes com e sem asfalto-borracha, verifica-se que o selante com asfalto-borracha dura cerca de 3 vezes mais que o sem borracha. Embora o uso do asfalto-borracha provoque um aumento de aproximadamente 50% nos custos destas atividades, quando comparados custo e vida útil, pode-se verificar que os serviços com asfalto-borracha são mais vantajosos.

SAM é uma espécie de tratamento superficial com asfalto-borracha, normalmente empregado para prevenir e/ou retardar a formação de trincas por reflexão em pavimentos asfálticos. Consiste em distribuir uma camada de ligante asfalto-borracha com cerca de 20% de borracha, à taxa de 1,8 a 3,2 l/m², sobre a superfície do pavimento existente, seguida de uma camada de agregados miúdos enquadrados entre as peneiras de abertura 12,7 mm e 6,35 mm, espalhados sobre o ligante. A menor sensibilidade ao efeito da temperatura e maior elasticidade do ligante asfalto-borracha conduzem a uma maior resistência às tensões provocadas pelo tráfego e pelas variações climáticas.

Segundo CAMPOS et al. (2000), as SAM proporcionam uma membrana à prova d’água, bastante durável, a qual apresenta capacidade de flexionar conjuntamente com o pavimento, quando este é solicitado por cargas do tráfego. Esta membrana apresenta, ainda, a propriedade de expandir e de retrair com as variações climáticas verificadas em casos extremos: nas regiões desérticas do Estado do Arizona, nos Estados Unidos, verifica-se o sucesso das SAM expostas a temperaturas ambientes variando de -35 a +50°C. As SAM também têm se mostrado eficientes quando aplicadas sobre bases granulares e de solo-cimento ou como revestimentos de rodovias de baixo tráfego.

Segundo CAMPOS et al. (2000), no caso de pavimentos que apresentam estágios avançados de fissuração, pode ser feita uma aplicação dupla de SAM: na primeira, é feito o recobrimento do banho de asfalto-borracha com agregados graúdos (passando na peneira 19,1 mm e retido na peneira 12,7 mm) e, na segunda, após novo ba-

nho de asfalto-borracha, promove-se nova cobertura com agregados miúdos (passando na peneira 12,7 mm e retido na peneira 9,52 mm). Este processo, executado de modo similar aos tratamentos superficiais duplos feitos no Brasil, é um procedimento alternativo quando a solução de restauração já é a de reconstrução do pavimento.

SAMI é uma camada de SAM aplicada entre as camadas existente e de reforço, a fim de retardar o desenvolvimento de trincas por reflexão e reduzir a penetração de água em camadas subjacentes. Dois tipos de SAMI são disponíveis: um composto por duas camadas (camada executada diretamente sobre pavimento existente e posterior aplicação de camada de reforço) e outro composto por três camadas, no qual a diferença com o primeiro está na execução de uma camada asfáltica com ligante convencional para nivelamento do pavimento existente.

Quanto à aplicação de borracha de pneu em concreto asfáltico usinado a quente, experiências indicam que ocorre incremento no desempenho destas misturas, em boa parte dos casos, podendo ser utilizadas misturas com granulometria densa, aberta ou descontínua.

Segundo CAMPOS et al. (2000), quanto às misturas de granulometria contínua (densas) utilizando ligante asfalto-borracha, são empregados os processos convencionais de produção, apresentando algumas modificações, especialmente com relação ao sistema de aquecimento. As misturas a quente de granulometria descontínua exigem teores de cimento asfáltico bastante elevados em comparação aos utilizados em misturas convencionais. Isto proporciona aumento da densidade da mistura e permite a selagem das trincas, impermeabilizando a superfície e protegendo as camadas subjacentes. Misturas asfalto-borracha de graduação descontínua também promovem aumento substancial da resistência à derrapagem e redução considerável do nível de ruídos do tráfego.

As misturas de granulometria aberta, empregando ligante asfalto-borracha, apresentam maior durabilidade que as misturas convencionais de granulometria aberta. A alta viscosidade do ligante asfalto-borracha favorece o aumento do filme asfáltico que envolve os agregados, tornando as misturas menos suscetíveis às intempéries (CAMPOS et al., 2000).

As misturas com granulometria aberta (drenante), constituídas com asfalto modificado com borracha, têm sido empregadas como camadas de desgaste em pavimentos flexíveis e rígidos. Na recuperação de pavimentos rígidos, inicialmente é feita a fresagem das juntas e o preenchimento com ligante asfalto-borracha; se o pavimento estiver em bom estado, promove-se o recapeamento das placas com uma camada de

asfalto-borracha esbelta (da ordem de 2,5 cm), com o objetivo de melhorar a regularidade longitudinal, reduzir a reflexão de trincas, aumentar a resistência à derrapagem e diminuir o ruído do tráfego. Se o pavimento rígido apresentar estágios avançados de degradação, emprega-se, após a selagem das juntas, uma camada de regularização composta com misturas asfalto-borracha de granulometria descontínua com 5,0 cm de espessura, seguida de uma camada de desgaste com mistura asfalto-borracha de granulometria aberta, com espessuras variando de 2,5 a 3,8 cm (CAMPOS et al., 2000).

No caso da recuperação de pavimentos flexíveis, destinada apenas à correção de características funcionais, as misturas asfalto-borracha têm sido aplicadas como camadas de revestimento ou de desgaste. Nestes casos, executa-se o recapeamento do pavimento existente com camadas delgadas empregando asfalto-borracha apresentando espessuras que variam entre 1,25 a 2,5 cm (CAMPOS et al., 2000).

Segundo CAMPOS et al. (2000), a comparação dos custos iniciais dessas soluções indica que o asfalto-borracha pode custar até cerca de duas vezes mais que o asfalto convencional. Estudos indicam que a incorporação do ligante asfalto-borracha a uma mistura asfáltica confere-lhe um aumento no custo, em relação às misturas densas convencionais (CAUQ), que pode variar de 25 a 75% quando a granulometria é descontínua e de 80 a 160% para granulometria aberta (camadas porosas). Contudo, a principal recomendação é que, em vez de se comparar exclusivamente os custos absolutos das misturas, sejam comparados os custos finais das alternativas, contemplando as soluções asfalto-borracha e convencional.

Outro aspecto a ser considerado quanto à aplicação e aos custos de misturas asfalto-borracha é a recomendação, feita pelos departamentos rodoviários dos Estados do Arizona e da Califórnia, de que as espessuras das camadas asfálticas modificadas com borracha podem ser reduzidas em 50% com relação às espessuras das camadas empregando misturas convencionais. Isto se deve à alta flexibilidade e à alta resistência ao envelhecimento das misturas contendo ligante tipo asfalto-borracha (CAMPOS et al., 2000).

Por se tratar de tecnologia de aplicação recente no Brasil, ainda não são disponíveis dados seguros e abrangentes dos custos de aplicação do asfalto-borracha no país. Dados do mercado norte-americano indicam que, em termos de custos iniciais, as misturas asfálticas empregando asfalto-borracha custam de 30 a 80% mais, por tonelada, que as misturas convencionais (VAN KIRK & HOLLERAN, 2000). Uma análise de custos de diversas alternativas de manutenção e reabilitação de pavimentos, empregando dados dos Estados da Califórnia, Texas e Arizona (HICKS & EPPS, 2000), indica

que o emprego de asfalto-borracha é recomendável para muitas das aplicações em pavimentação. Porém, trata-se de uma alternativa viável somente quando a espessura da camada asfáltica é reduzida e quando é possível um aumento da vida útil do pavimento.

Porém, a avaliação econômica das alternativas asfalto-borracha deve levar em consideração também os benefícios ambientais que, na maioria das vezes, são de difícil quantificação. Uma análise de custos totais realística associada à redução dos problemas ambientais gerados pelos pneus descartados podem justificar, em boa parte dos casos, a opção pelas alternativas asfalto-borracha.

4.2.5. Execução

A principal diferença entre a produção de misturas asfálticas empregando ligante asfalto-borracha e de misturas asfálticas convencionais é a pré-mistura (reação da borracha com o cimento asfáltico) para produzir o ligante asfalto-borracha. Neste processo, a borracha é adicionada ao asfalto, que deve estar a uma temperatura entre 175 e 200°C. O cimento asfáltico e a borracha devem ser colocados e misturados em um tanque de reação, onde ocorre a reação entre estes dois componentes, e, então, bombeados para um tanque de armazenamento. O tanque de armazenamento deve possuir um sistema mecânico com agitação constante, mantendo a mistura dispersa.

A execução da camada asfáltica empregando concreto asfáltico contendo ligante asfalto-borracha é similar à execução de camadas com misturas convencionais. A temperatura de mistura do ligante asfalto-borracha com os agregados deve estar entre 160 e 190°C. A temperatura de lançamento da mistura na pista geralmente é mais alta que as usuais para materiais convencionais e a compactação deve ser realizada enquanto o material está quente, pois a viscosidade deste ligante aumenta rapidamente.

No relato da experiência da execução de um recapeamento na rodovia BR 116, no Rio Grande do Sul, RUWER et al. (2001) apontam que a temperatura média de usinagem da mistura com ligante asfalto-borracha situou-se na faixa de 165 a 170°C, com os agregados minerais a uma temperatura entre 175 e 180°C. A temperatura da massa asfáltica, após usinagem, ficou em torno de 170°C e a temperatura de compactação, na pista, em torno de 155°C.

Segundo a literatura, na compactação da camada não devem ser empregados rolos do tipo pneumático nem vibratório e sim rolos metálicos. Os produtos empregados na limpeza dos equipamentos (rolos metálicos, por exemplo) não devem ser à base de petróleo. Devem ser utilizados detergentes. Porém, RUWER et al. (2001) relatam a utilização de rolos pneumáticos e metálicos na compactação da mistura asfáltica no recapeamento da rodovia BR 116. Segundo estes autores, a compactação deve ser iniciada com baixa pressão do rolo pneumático.

Na experiência relatada por RUWER et al. (2001) foram utilizados dois rolos pneumáticos SP 8000 e dois rolos tandem. A compactação foi iniciada por meio de 4 passadas completas (a espessura do recapeamento era de 3 cm), com pressão de 80 psi (5,62 kgf/cm²) e completada com 3 passadas com pressão de 120 psi (8,44 kgf/cm²). Nesta experiência, após a compactação, o trânsito foi liberado normalmente.

RUWER et al. (2001) sugerem que, para manter a temperatura da mistura dentro do padrão necessário, deve-se limitar o avanço da vibro-acabadora para que a frente de rolagem esteja sempre próxima a ela. Deve-se ainda tomar cuidado especial com a segregação da massa por diferencial de temperatura, provocada pelas laterais da caçamba dos basculantes e o cone do monte de massa, que pode esfriar rapidamente. Isto certamente acarretará dificuldades na compactação e poderá resultar em uma camada segregada visualmente e, conseqüentemente, inadequada.

3.3. O ligante asfalto-borracha

3.3.1. Introdução

Segundo ODA (2000), no processo úmido, a interação entre o cimento asfáltico e a borracha é classificada como uma reação, cujo resultado é um produto com propriedades reológicas diferentes do cimento asfáltico original. Este grau de modificação depende de vários fatores como:

- a forma, o tamanho e a distribuição granulométrica das partículas de borracha;
- a proporção de cimento asfáltico e borracha;

- o tempo de reação;
- a temperatura de reação;
- a compatibilidade do cimento asfáltico com a borracha;
- a energia mecânica aplicada durante a mistura e a reação; e
- o uso de aditivos, como óleos extensores, por exemplo.

A reação entre a borracha e o cimento asfáltico se dá mediante a absorção de óleos aromáticos do cimento asfáltico à cadeia de polímeros da borracha natural e sintética. A viscosidade do asfalto-borracha é usada para monitorar este processo. A viscosidade, sob altas temperaturas, de um cimento asfáltico modificado com, por exemplo, 15% de borracha, pode aumentar 10 vezes ou mais. A taxa de reação entre a borracha e o cimento asfáltico pode aumentar por meio da ampliação da área das partículas de borracha, alcançada pela diminuição do tamanho destas partículas.

Conforme LEITE (1999), na interação asfalto-borracha, a borracha incha devido à absorção de óleos aromáticos do cimento asfáltico, formando um gel viscoso e aumentando a viscosidade do ligante. Se a temperatura for alta ou o tempo de reação longo, maior será a taxa de dissolução da borracha no asfalto. A borracha desintegra no asfalto, formando uma rede asfalto-borracha menor, reduzindo a viscosidade do ligante.

A habilidade da borracha em melhorar as propriedades do cimento asfáltico depende da compatibilidade deste com a borracha. O tipo e a quantidade de óleos aromáticos presentes no cimento asfáltico desempenham um papel significativo na determinação desta compatibilidade (HEITZMAN, 1992). A adição de óleo extensor, produto rico em óleos aromáticos, em quantidades adequadas, favorece esta reação, evitando um aumento excessivo da viscosidade do produto final. Segundo ROBERTS et al. (1998), se forem adicionados menos que 10% de borracha não é necessário uso de óleos extensores.

A fim de se produzir ligante asfalto-borracha com boas características, é necessário estabelecer a temperatura e o tempo de reação entre o cimento asfáltico e a borracha. A viscosidade é utilizada como parâmetro de controle da mistura, sendo verificada periodicamente durante a produção do ligante, até atingir valores constantes, indicando que a reação inicial está praticamente completa e o ligante pronto para ser utilizado. A viscosidade pode diminuir ainda mais se ~~se~~ continuar a misturação, porém a incorporação das partículas de borracha ao cimento asfáltico não é rápida, podendo requerer algumas horas sob temperaturas altas (ROBERTS et al., 1998).

O tempo de reação corresponde ao tempo necessário para que resulte um produto uniforme, com consistência homogênea, e é função do teor e da granulometria da borracha, do tipo de cimento asfáltico e da temperatura da mistura. Este tempo pode ser reduzido caso seja utilizada borracha muito fina, cimentos asfálticos menos viscosos e temperaturas altas durante a mistura. O aquecimento do ligante visa a obtenção da viscosidade adequada, de forma a facilitar a mistura e a incorporação da borracha. Cuidado especial deve ser tomado com relação à temperatura de reação, pois temperaturas elevadas podem provocar a perda de voláteis e o envelhecimento precoce do cimento asfáltico, reduzindo sua qualidade.

Segundo ODA (2000), antes de preparar o ligante asfalto-borracha devem ser analisadas as características da borracha e do ligante asfáltico que serão utilizados. Verifica-se, especialmente, a compatibilidade entre o cimento asfáltico e a borracha com relação à polaridade. Procura-se trabalhar com borrachas polares, pois no modelo molecular dos asfaltos, as moléculas polares formam a estrutura que fornece as propriedades elásticas. As moléculas polares se agrupam e formam uma estrutura que, após retirada da tensão aplicada, tende a recuperar sua configuração original. Esta estrutura é envolvida por moléculas apolares, que fazem a interface com o cimento asfáltico e que contribuem para a melhoria das suas propriedades viscosas.

Os componentes devem ser misturados com freqüente agitação, a fim de evitar a segregação das partículas de borracha, empregando equipamento com sistema para controlar a temperatura e o tempo de reação. Geralmente, o ligante asfalto-borracha deve ser utilizado em poucas horas, principalmente quando se trabalha com borracha mais grossa ou com porcentagens elevadas de borracha, pois, em função do período de estocagem, pode ocorrer um aumento da viscosidade do ligante obtido e, em alguns casos, a sedimentação das partículas de borracha que não reagiram com o cimento asfáltico.

O tipo de equipamento utilizado no preparo do asfalto-borracha pode influenciar sua homogeneidade. O equipamento deve conter um recipiente com controle de temperatura e um agitador. Os agitadores mais comuns atingem rotação de até 4 500 rpm e tem hélice cisalhante. O misturador empregado na produção do asfalto-borracha utilizado nesta pesquisa está ilustrado na Fig. 4.4 desta dissertação (pág. 98).

Existem especificações técnicas para o ligante asfalto-borracha, com exigências de propriedades que devem ser atendidas, visando sua utilização sob diferentes

condições climáticas. Dentre as citadas por ODA (2000) estão as especificações da BAKER RUBBER Inc. (Tabela 3.1) e da ASTM-D6114 (Tabela 3.2).

Ambas as especificações são baseadas nas características climáticas. A ASTM (1997) apresenta uma especificação para três ligantes diferentes, que foram relacionados com a média das temperaturas máxima e mínima. Considerando a temperatura média das máximas semanais, os limites estabelecidos foram: maior que 43°C, de 27 a 43°C e menor que 27°C. Enquanto que, segundo a temperatura média das mínimas mensais, os limites estabelecidos são: maior que -1°C, de -9 a -1°C e menor que -9°C.

Segundo ODA (2000), no Estado de São Paulo, a média das temperaturas máximas nos últimos cinco anos é 33,1°, ao passo que a média das temperaturas mínimas nesse período é 9,1°C. Considerando a média das mínimas de temperatura, o ligante asfalto-borracha deve atender o Tipo I da ASTM e o Tipo ARB-1 proposto pela BAKER RUBBER Inc.

Tabela 3.1. Especificação para diferentes tipos de ligante asfalto-borracha proposta pela BAKER RUBBER Inc. (1988)¹ apud ODA (2000)

tipo de cimento asfáltico	ARB-1	ARB-2	ARB-3
método de ensaio	zona climática		
média das máximas semanais de temperatura (°C)	> 38	26 a 38	< 26
média das mínimas mensais de temperatura (°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
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

¹BAKER RUBBER Inc. (1988). *Production of crumb rubber modifier (CRM) material*. FHWA. Workshop notes. Session 3.0. Design Procedures and Construction Practices.

Tabela 3.2. Propriedades físicas de ligantes asfalto-borracha (ASTM, 1997² apud ODA, 2000)

cimento asfáltico		tipo 1	tipo 2	tipo 3
método de ensaio				
viscosidade aparente (cP) 175°C	mín	1500	1500	1500
método modificado ASTM D2196, método A ^{A,B}	máx	5000	5000	5000
penetração, 25°C, 100 g, 5 s, 1/10 mm	mín	25	25	50
(ASTM D5)	máx	75	75	100
penetração, 4°C, 200 g, 60 s, 1/10 mm (ASTM D5)	mín	10	15	25
ponto de amolecimento, °C (ASTM D36)	mín	57,2	54,4	51,7
resiliência (%), 25°C – ASTM D5329	mín	25	20	10
ponto de fulgor, °C (ASTM D93)	mín	232,2	232,2	232,2
ensaio com resíduo em estufa de filme fino (ASTM D1754) ^C				
penetração, 4°C, % original (ASTM D5)	mín	75	75	75

^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 HA, usar “spindle” 3 a 20 rpm.

^BPodem ser utilizados viscosímetros tipo Rion ou Haake (com rotor nº 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 ensaio de resíduo TFOT.

No entanto, se for considerada a média das máximas de temperatura, o ligante asfalto-borracha deve atender o Tipo II da ASTM e o tipo ARB-2 proposto pela BAKER RUBBER Inc. Como no Brasil os principais defeitos nos pavimentos ocorrem sob condições de temperatura elevada, considera-se o Tipo II da especificação ASTM e o ARB-2 da especificação da BAKER RUBBER Inc.

3.3.2. Materiais utilizados na produção do ligante asfalto-borracha

²ASTM (1997). *Standard specifications for asphalt-rubber binder*. American Society for Testing and Materials. ASTM D6114/1997.

São basicamente dois os elementos necessários à produção do ligante asfalto-borracha, ou seja, o cimento asfáltico e a borracha moída, e para melhorar a compatibilização entre eles pode ser utilizado um óleo extensor de borracha. Para facilitar a aplicação do ligante asfalto-borracha pode ser utilizado um diluente, como querosene, por exemplo, que irá reduzir a viscosidade do material.

No Estado de São Paulo, o cimento asfáltico empregado em obras de pavimentação é o CAP 20. Em algumas regiões do país, com clima mais quente, é utilizado o CAP 40, que apresenta maior viscosidade.

Quanto à borracha, três são os fatores relevantes sobre a qualidade do ligante asfalto-borracha: o tipo, o tamanho das partículas e o teor de borracha.

Segundo RUTH et al. (1997)³ apud ODA (2000), os pneus de automóveis são compostos por uma quantidade maior de borracha sintética, ao passo que os pneus de caminhões são compostos por uma quantidade maior de borracha natural. A borracha natural fornece as propriedades elásticas e a borracha sintética proporciona a estabilidade térmica.

Segundo ROBERTS & LYTTON (1987), muitos tipos diferentes de borracha estão disponíveis para o emprego em sistemas asfalto-borracha. A composição química da borracha depende, normalmente, do tipo de pneu, seja de automóvel, caminhão ou ônibus, e se o pneu é aproveitado total ou parcialmente. O tipo de borracha empregado na mistura afeta a elasticidade e a estabilidade do asfalto-borracha.

De acordo com TAKALLOU & TAKALLOU (1991), a borracha obtida da trituração das camadas externas do pneu (restos do processo de recauchutagem) é mais uniforme que a borracha produzida no processamento do pneu inteiro.

O tamanho das partículas de borracha pode variar com o processo de produção, envolvendo tipo de equipamento utilizado, temperatura de processamento, etc. Segundo ROBERTS & LYTTON (1987), o método de obtenção da borracha afeta significativamente a incorporação da borracha ao cimento asfáltico e as propriedades do produto final.

³RUTH, B. E.; TIA, M.; JONSSON, G.; SETZE, J. C. (1997). Recycling of asphalt mixtures containing crumb rubber. Final Report. FL/DOT/MO D510717. University of Florida. Florida Department of Transportation, 221 p.

Atualmente há quatro métodos de trituração da borracha de pneus descartados: processo “crackermill”, processo “granulator”, processo “micromill” e processo “cryogenic”. Os três primeiros são realizados sob temperatura ambiente e o último sob temperaturas baixas. Cada método fornece partículas de borracha com características específicas.

O processo “crackermill” é, atualmente, o mais comum para a produção de borracha moída e fornece partículas de formato irregular com grande área superficial, cujo tamanho varia de 4,8 a 0,42 mm. O processo “granulator” gera partículas de forma cúbica e uniforme com uma pequena área superficial, com tamanho variando de 9,5 a 2,0 mm. E o processo “micromill” fornece partículas finas, com tamanho variando de 0,42 a 0,075 mm. O processo “cryogenic” consiste na imersão da borracha em nitrogênio líquido (-90 a -200°C). Abaixo de -60°C a borracha se torna um material bastante frágil, facilitando sua trituração.

O Departamento de Transportes dos Estado da Flórida, por exemplo, especifica o uso, em misturas asfálticas, de borracha moída obtida por processos nos quais a trituração ocorra à temperatura ambiente. Acredita-se que a textura irregular das partículas obtidas por estes processos proporcione maiores velocidades de reação e maior viscosidade e estabilidade à estocagem do ligante obtido. As partículas obtidas pelo processo “cryogenic” são quebradiças e angulares e presume-se que isto provoque diminuição da velocidade de reação e proporcione ligante asfalto-borracha com baixa viscosidade e com maior tendência à sedimentação (WEST et al., 1998).

WEST et al. (1998) conclui, com base em um estudo sobre a influência do processo de trituração da borracha nas características do ligante asfalto-borracha, que qualquer um dos processos acima tem efeito significativo na forma, na textura e em certas propriedades físicas das partículas de borracha e estes fatores, por sua vez, influenciam a qualidade do ligante produzido. Com relação à viscosidade do ligante, WEST et al. (1998) concluíram que as partículas de borracha com maior área superficial e formas mais irregulares resultam em viscosidades maiores.

Após a trituração, ocorre separação e a retirada dos demais componentes dos pneus, como o aço e as fibras. Em geral, segundo HEITZMAN (1992), um pneu pesando aproximadamente 9 kg produzirá de 4,5 a 5,5 kg de borracha.

3.4. Experiências do uso de borracha de pneu em misturas asfálticas

Em 1994 o TRB e a AASHTO ("American Association of State Highway and Transportation Officials") por meio do NCHRP ("National Cooperative Highway Research Program"), publicaram uma síntese dos principais estudos sobre o uso de borracha de pneu realizados nos EUA, envolvendo, aproximadamente, 500 trabalhos publicados e experiências dos departamentos de estradas de rodagem norte-americanos.

Nessa publicação (EPPS, 1994), podem ser encontradas várias aplicações dos pneus descartados em obras de engenharia civil, inclusive em misturas asfálticas. Nele são discutidas também algumas das principais propriedades das misturas asfálticas modificadas com borracha: parâmetros Marshall (estabilidade, fluência, volume de vazios, vazios do agregado mineral e densidade), módulo de resiliência, deformação permanente, fadiga, resistência à tração, suscetibilidade à ação da água, formação de trincas de origem térmica, resistência à abrasão e atrito superficial.

Outras referências complementam as informações contidas nessa síntese. É importante destacar que, de forma geral, as propriedades das misturas asfálticas corriqueiramente avaliadas são muito sensíveis a fatores como: tipo, dimensão máxima e granulometria dos agregados minerais e da borracha de pneu, tipo e teor de cimento asfáltico, temperatura de confecção das misturas, processo de compactação e outros fatores intervenientes. Sob esta ótica, algumas das conclusões de estudos sobre a incorporação de borracha às misturas asfálticas são válidas apenas para as condições particulares nas quais foram ensaiadas, embora, em muitos casos, verifica-se melhoria das propriedades mecânicas das misturas que contém borracha.

3.4.1. Parâmetros Marshall

Quanto à estabilidade e fluência Marshall, esta síntese mostra alguns estudos nos quais as misturas com asfalto-borracha apresentam diminuição da estabilidade em relação às misturas de referência. HANSON et al. (1994) comentam que esta redução pode chegar a 60% em relação aos valores obtidos para misturas convencionais. Porém, isto parece não ser regra geral, pois ROBERTS & LYTTON (1987) comentam

que corpos-de-prova, moldados de acordo com o procedimento desenvolvido pelo FAA ("Federal Aviation Administration"), para o projeto de misturas asfálticas modificadas com borracha, apresentaram estabilidade maior que os das misturas convencionais.

Segundo EPPS (1994), é também notado o aumento da fluência (de até 4,2 vezes os valores obtidos para misturas convencionais, segundo HANSON et al., 1994), do volume de vazios e dos vazios do agregado mineral, acompanhado da não variação da densidade máxima da mistura.

A granulometria da borracha adicionada ao ligante tem influência significativa na estabilidade e na fluência de misturas. Estudos indicam que uma mistura modificada com partículas grossas de borracha apresenta valores de estabilidade Marshall 49% menores e de fluência Marshall 50% maiores que os verificados para uma mistura modificada com partículas finas (HANSON, 1994).

3.4.2. Módulo de resiliência

Os valores de módulo de resiliência das misturas com asfalto-borracha, segundo EPPS (1994), podem ser maiores ou menores que os obtidos para misturas convencionais, dependendo de vários fatores. Tipicamente, valores menores são obtidos em misturas contendo asfalto-borracha. Experiências realizadas nos Estados de Oregon e California indicam que misturas produzidas pelo processo seco têm módulo de resiliência maior que aquelas produzidas pelo processo úmido.

JIMENEZ (1962)⁴ apud HANSON et al. (1994) constatou que o módulo de resiliência de misturas modificadas com borracha corresponde a aproximadamente 75% dos valores obtidos para misturas convencionais. No estudo efetuado por VALLERGA et al. (1980)⁵ apud HANSON et al. (1994), verificou-se que os valores de módulo de resiliência de misturas modificadas com borracha são menores que os obtidos com misturas convencionais, mas apenas para temperaturas menores que 24°C. Para as tempera-

⁴JIMENEZ, R. A. (1962). Behavior of asphaltic concrete diaphragms to repetitive loads. *International Conference on Structural Design of Asphalt Pavements*.

⁵VALLERGA, W. B.; MORRIS, G. R.; HUFFMAN, J. E.; HUFF, B. J. (1980). Applicability of asphalt-rubber membrane in reducing reflection cracking. *Proceedings of the Association of Asphalt Paving Technologists*, v. 49.

turas acima deste valor, o módulo de resiliência das misturas modificadas com borracha é maior que os valores obtidos com misturas convencionais.

VALLERGA et al. (1980)⁵ apud HANSON et al. (1994) verificou que misturas modificadas com partículas finas de borracha apresentam maiores valores de módulo de resiliência que aquelas modificadas com partículas grossas. Outros estudos indicam que misturas com altos teores de borracha apresentam baixos valores de módulo de resiliência e que, para baixos teores de borracha, as partículas finas de borracha podem apresentar um efeito mais significativo sobre o módulo de resiliência.

LEITE et al. (2000) observou uma redução de aproximadamente 50% no valor do módulo de resiliência de misturas empregando ligante asfalto-borracha, em relação à mistura convencional (CAP 20).

3.4.3. Deformação permanente

Segundo EPPS (1994), estudos conduzidos nos Estados do Texas e Nevada, nos Estados Unidos, apontam que as misturas modificadas com borracha e misturas convencionais apresentam resistência similar à deformação permanente. Um estudo do Estado da Virginia (MAUPIN, 1992) indicou que misturas com ligante asfalto-borracha tiveram menor resistência à deformação permanente. Em geral, misturas executadas tanto pelo processo seco quanto pelo úmido apresentam comportamento similar quanto a esta propriedade (LaGRONE, 1981⁶ apud EPPS, 1994).

O estudo de STEPHENS (1982) indica que as misturas asfálticas modificadas com borracha avaliadas apresentaram menor resistência à deformação permanente, medida por meio do ensaio de fluência por compressão uniaxial estática, que as misturas convencionais, e que esta diferença é mais pronunciada para temperaturas mais altas. Segundo este pesquisador, misturas com partículas finas de borracha apresentaram maior resistência ao acúmulo de deformação permanente que misturas com partículas graúdas.

Os resultados dos ensaios de fluência por compressão uniaxial dinâmica feitos por STEPHENS (1982) mostraram que as misturas modificadas com borracha possuem maior resistência ao acúmulo de deformação permanente que as misturas conven-

⁶LaGRONE, B. D. (1981). *Rubber used in asphalt-rubber applications*. Presented at the National Seminar of Asphalt-rubber.

cionais, o que também foi constatado por VALLERGA et al. (1980)⁵, segundo HANSON et al. (1994). Os estudos de VALLERGA et al. (1980)⁵ apud HANSON et al. (1994) e de STEPHENS (1982) mostram que, sob carga constante, as misturas modificadas com borracha deformam mais que as misturas convencionais, enquanto que sob carga repetida, as misturas modificadas com borracha deformam menos que as convencionais.

Os resultados do estudo feito por LEITE et al. (2000) indicam que ocorre um aumento da resistência à deformação permanente para misturas com asfalto-borracha, avaliada por meio dos ensaios de fluência por compressão uniaxial estática e dinâmica, à temperatura de 25°C, e do ensaio de trilha de roda, com o simulador de tráfego tipo LCPC.

Os resultados apresentados por LEITE et al. (2000) indicam que a deformação permanente, medida por meio dos ensaios de fluência, da mistura que utiliza asfalto-borracha é cerca de quatro vezes menor que a verificada para a mistura de referência (empregando CAP 20), para ambos os ensaios. Os resultados do simulador de tráfego indicam que a mistura com asfalto-borracha apresenta melhor desempenho que a convencional. Neste ensaio, foi verificado que a deformação permanente é independente do teor de cimento asfáltico das misturas, o que representa uma vantagem em relação a outros tipos de modificadores (polímeros).

3.4.4. *Fadiga*

A vida à fadiga aumenta quando há adição de borracha nas misturas asfálticas, tanto pelo processo seco como pelo processo úmido. O comportamento à fadiga é afetado por diversos fatores, dentre eles: tipo e granulometria do agregado e da borracha, teor de borracha, temperatura de reação, volume de vazios, entre outras variáveis. PIGGOTT & WOODHAMS (1977)⁷ apud HANSON et al. (1994) concluem que o acréscimo de 5% de borracha ao CAUQ provavelmente irá duplicar sua resistência à fadiga em relação a uma mistura convencional.

VALLERGA et al. (1980)⁵ apud HANSON et al. (1994) estudaram o comportamento à fadiga de misturas asfálticas empregando diversos teores de ligante asfalto-

⁷PIGGOTT, M. R.; WOODHAMS, R. T. (1977). Improved hot mix asphalts containing reclaimed rubbers. *Proceedings of the Association of Asphalt Paving Technologists*, v. 46.

borracha, adicionando também óleo extensor, em uma faixa de temperatura de 1 a 40°C. Os autores verificaram que o desempenho das misturas modificadas com borracha era melhor para teores maiores de ligante. Eles compararam misturas modificadas com borracha com uma mistura convencional e constataram que, para temperaturas abaixo de 16°C, todas as misturas modificadas com borracha, exceto a que tinha o menor teor de ligante (4,23%), apresentaram melhor desempenho. Para temperaturas maiores que 16°C, em todas as misturas modificadas com borracha, o desempenho é superior à convencional.

3.4.5. Outras características mecânicas das misturas asfálticas modificadas com borracha

Segundo EPPS (1994), a resistência a tração pode aumentar ou diminuir quando há adição de borracha. O estudo desenvolvido por LEITE et al. (2000) indica que ocorre aumento da resistência a tração das misturas com asfalto-borracha estudadas por estes autores, em relação à mistura de referência (utilizando CAP 20). RUWER et al. (2001), estudando um CAUQ composto por CAP 20 e borracha moída, obteve o valor de 1,2 MPa para a resistência à tração.

A sensibilidade à ação da água pode ser um problema quando a borracha é empregada nas misturas asfálticas, exigindo-se maiores pesquisas a este respeito. HANSON et al. (1994) verificaram uma redução de 50% na resistência a tração em misturas contendo borracha, após imersão, ao passo que a redução na resistência a tração da mistura de referência, também após imersão, foi de 62%, indicando que as misturas modificadas apresentam menor suscetibilidade à ação da água.

A resistência à formação de trincas de origem térmica aumenta, segundo estudo realizado pela ESSO belga (ESSO, 1984⁸ apud EPPS, 1994). O asfalto de base e o grau de reação, entre outros fatores, controlam as propriedades do ligante sob baixa temperatura e a resistência à formação de trincas de origem térmica.

Quanto à abrasão superficial, alguns estudos indicam aumento da resistência à abrasão, ao passo que outros indicam diminuição. O atrito superficial normalmente é

⁸ESSO (1984). *Open-graded and dense-graded mixes with asphalt rubber*. Bélgica.

reduzido quando são utilizadas misturas com asfalto-borracha, porém um estudo (ESCH, 1984⁹ apud EPPS, 1994) conduzido no estado do Alaska, nos Estados Unidos, indicou redução da distância de frenagem, em condições de congelamento, quando foram utilizadas misturas executadas pelo processo seco.

4.4.6. Outros estudos

KRUTZ & STROUP-GARDINER (1992) desenvolveram estudos sobre o desempenho de misturas asfálticas utilizando ligante asfalto-borracha, mediante os ensaios de fluência por compressão uniaxial estática e triaxial confinado com carga repetida. Foram empregados neste estudo um tipo de agregado (granito), uma faixa granulométrica e seis cimentos asfálticos diferentes: AC-5, AC-5 + 17% borracha (AC5R), AC-5 + 16% borracha + 5% óleo extensor (AC5RE), AC-20, AC-20 + 16% borracha (AC20R) e AC-40. Cada amostra composta de 3 corpos-de-prova foi ensaiada a duas temperaturas diferentes (25 e 40°C).

No ensaio de fluência por compressão uniaxial estática foi realizado um condicionamento do corpo-de-prova durante 2 min, com aplicação de carga de mesma magnitude da utilizada ao longo do ensaio, seguido de 5 min de descanso. O carregamento foi aplicado durante 60 min, seguido de um período de 15 min de descanso. A tensão empregada no ensaio a 25°C foi de 0,34 MPa e de 0,14 MPa a 40°C. O ensaio triaxial foi realizado com 5.200 ciclos de 0,1 s de carregamento e 0,6 s de repouso. A pressão de confinamento utilizada foi de 0,1 MPa e a tensão desvio foi de 0,34 MPa e 0,14 MPa para as temperaturas de 25 e 40°C, respectivamente.

A Tabela 3.3. apresenta os resultados do módulo de rigidez à fluência (média dos resultados de três corpos-de-prova), obtidos com base nas leituras de deformações após 60 min de carregamento, para as duas temperaturas de ensaio. O módulo de rigidez à fluência é calculado como a relação entre a tensão aplicada e a deformação permanente total sofrida pelo corpo-de-prova ao fim do período de carregamento.

⁹ESCH, D. C. (1984). *Asphalt pavements modified with coarse rubber particles – design, construction and ice control observations*. Report n. FHWA-AK-RD-85-07, Alaska Department of Transportation.

Neste ensaio ficou constatado que, para a temperatura de 25°C, os valores de deformação permanente das misturas modificadas com borracha diminuem à medida que aumenta a viscosidade do ligante.

Tabela 3.3. Módulos de rigidez à fluência médios obtidos no ensaio de fluência por compressão uniaxial estática. [Fonte: KRUTZ & STROUP-GARDINER et al. (1992)]

cimento asfáltico	módulo de rigidez à fluência (MPa)	
	25°C	40°C
AC5	rompeu durante carregamento	rompeu durante carregamento
AC20	37,89	19,28
AC40	não disponível	não disponível
AC5RE	20,85	25,30
AC5R	25,63	29,98
AC20R	47,44	30,20

Para o ensaio estático à temperatura de 40°C, foi verificado desempenho bastante semelhante das misturas modificadas por borracha. A mistura AC5 rompeu na fase de condicionamento e a mistura AC20 (sem borracha) chegou ao final do ensaio com deformações maiores que as demais (com borracha). Os autores apontam a hipótese de que, neste caso, a borracha tenha absorvido o carregamento e a deformação seja, portanto, independente do cimento asfáltico básico.

Uma comparação do desempenho das misturas, nas duas temperaturas de ensaio, indica que as misturas modificadas por borracha sofrem uma menor perda de rigidez com o aumento da temperatura que as misturas não modificadas. É importante notar também que a mistura AC5RE apresentou um ligeiro aumento na rigidez à fluência na temperatura de 40°C.

Os resultados do ensaio triaxial com carga repetida indicaram que todas as misturas não modificadas com borracha apresentaram grande diminuição da rigidez à fluência com o aumento da temperatura (de 25 para 40°C). As misturas modificadas mostraram menor diminuição da rigidez, em relação às misturas não modificadas, ou aumento, como no caso da mistura AC5RE, evidenciando que a adição de borracha na mistura reduz a magnitude da perda da rigidez sob temperaturas elevadas.

As conclusões gerais deste estudo são:

- ambos os ensaios indicaram que a adição de borracha moída de pneus nas misturas asfálticas resulta em misturas com menor deformação permanente, sob temperaturas elevadas, em comparação com misturas sem adição de borracha, mesmo considerando que as misturas com asfalto-borracha foram preparadas com teor de ligante maior que o ótimo;
- os resultados obtidos para os ensaios realizados à 25°C são úteis na avaliação da perda de rigidez à fluência, quando comparados com os resultados obtidos na temperatura de 40°C; porém, tais resultados parecem não ser apropriados para a caracterização de deformação permanente, devido ao baixo valor adotado para a temperatura de ensaio;
- os ensaios para avaliar a deformação permanente das misturas asfálticas devem incorporar carregamento repetido. Os resultados do ensaio estático indicam apenas a influência da borracha e não refletem a influência das propriedades do ligante básico sobre o comportamento das misturas. O ensaio com carga repetida, por outro lado, indica, de forma concreta, a influência do tipo de ligante empregado nas misturas.

MAUPIN (1992) descreve o estudo realizado no estado de Virginia, nos Estados Unidos, envolvendo trechos experimentais empregando CAUQ modificado com borracha e ensaios de laboratório. Um dos ensaios de laboratório realizados foi o de fluência por compressão uniaxial estática. A temperatura de ensaio foi 40°C e a tensão foi 0,21 MPa, aplicada durante 60 min, antecedidos por período de condicionamento com aplicação da mesma tensão durante 2 min, seguidos de 5 min de descanso. Os resultados obtidos de corpos-de-prova moldados com o mesmo material utilizado na execução dos trechos experimentais indicam diminuição da rigidez à fluência e aumento da deformação permanente das misturas modificadas com borracha em relação às misturas convencionais.

KHEDAYWI et al. (1993) desenvolveram um estudo na Jordânia sobre o efeito do tamanho das partículas de borracha sobre o desempenho das misturas asfálticas. Empregaram, neste estudo, um asfalto de penetração 80-100, agregado mineral calcário e borracha de pneu, separadas por tamanho de partículas nas seguintes faixas: material passado na #16 (1,19 mm) e retido na #20 (0,84 mm), passado na #20 e retido na #50 (0,297 mm) e passado na #50 e retido na #200 (0,075 mm). Dentre as principais conclusões deste estudo estão:

- para um volume de vazios de 4%, os valores de estabilidade Marshall diminuem com o aumento do teor de borracha, ao passo que os valores de fluência Marshall e vazios do agregado mineral aumentam;
- as misturas asfálticas com partículas de borracha passadas na #16 e retidas na #20, apresentaram valores menores de fluência Marshall que os obtidos para as misturas com partículas passadas na #20 e retidas na #50, indicando um aumento da fluência Marshall com a diminuição do tamanho das partículas de borracha;
- a sensibilidade à ação da água foi avaliada em termos de estabilidade retida, calculada como a razão entre a estabilidade Marshall com imersão e sem imersão. Alguns pesquisadores indicam que esta razão não deve ser menor que 75%. Foi constatado que a maior parte das misturas apresentou estabilidade retida superior a 75% e que ela diminui com o aumento do teor de borracha.

HANSON et al. (1994) apresentam os resultados de um estudo no qual foram executados dois trechos experimentais, no Estado de Mississippi nos Estados Unidos, um com revestimento de concreto asfáltico modificado com borracha e outro com concreto asfáltico convencional. O desempenho das misturas na pista foi avaliado, durante o período de dois anos, e comparado com o desempenho das misturas ensaiadas em laboratório, por meio dos ensaios de compressão triaxial com carga estática e dinâmica, tração indireta e módulo de resiliência. O asfalto empregado foi um AC-30 modificado com 5% de borracha. Dentre as principais conclusões deste estudo estão:

- os valores de módulo de resiliência da mistura de referência são menores que os da mistura modificada com borracha. O módulo de resiliência medido a 4, 25 e 40°C aumenta com o tempo, de modo similar para a mistura convencional e para a modificada com borracha;
- os resultados dos ensaios de fluência, com amostras retiradas da pista, indicaram que a mistura de referência apresenta maior tendência ao acúmulo de deformação permanente que a mistura modificada com borracha. As deformações permanentes medidas na pista são maiores para a mistura convencional que para a modificada, indicando densificação mais rápida da mistura convencional. Os resultados de laboratório para estes ensaios indicaram que não há diferença estatística no desempenho das duas misturas;

- a resistência à tração dos corpos-de-prova confeccionados em laboratório e dos retirados da pista é similar para ambas as misturas. Os corpos-de-prova da mistura modificada, após imersão, tiveram perda de 50% na resistência à tração e os da mistura convencional sofreram perda de 62%, indicando que as misturas modificadas com borracha apresentam menor suscetibilidade à ação da água.

Outro estudo motivado pela Lei sobre a Eficiência do Transporte Intermodal de Superfície, citada anteriormente, foi desenvolvido pelo Departamento de Transportes de Maryland e pela Universidade de Maryland, nos Estados Unidos, a fim de levantar as informações essenciais sobre a caracterização do ligante asfalto-borracha, estudar o projeto das misturas e avaliar o desempenho no campo (AYRES & VITCZAK, 1995).

Nesta pesquisa foram avaliadas 14 misturas diferentes, sendo uma convencional e 13 modificadas com asfalto-borracha, e trinta seções, construídas em duas rodovias, totalizando 12,5 km. No artigo publicado por AYRES & VITCZAK (1995) são apresentados apenas os resultados dos ensaios de módulo de resiliência, embora os estudos de laboratório tenham envolvido também o levantamento de características de resistência à tração e de deformação permanente das misturas. Todos os ensaios foram executados com amostras retiradas das seções.

Os ensaios de módulo de resiliência foram efetuados empregando o dispositivo de Baladi, desenvolvido na Universidade de Michigan e posteriormente aperfeiçoado pelo Centro de Pesquisas em Transportes do Estado da Louisiana ("LTRC – Louisiana Transportation Research Center"), que é composto de um sistema hidráulico para aplicação de carga ao longo do diâmetro (pulsos de 0,1 s de carregamento e 0,9 s de repouso) e uma câmara para acondicionamento térmico do corpo-de-prova. As temperaturas usadas foram: 4,4°C, 21,1°C e 37,8°C. Foram medidas as deformações horizontais, verticais e longitudinais, com o uso de 5 LVDTs posicionados em cada um dos lados do corpo-de-prova.

Segundo este estudo, os valores de módulo de resiliência obtidos da mistura convencional (AC-20) são maiores que os valores obtidos das outras 13 misturas para as diferentes temperaturas de ensaio. Para todas as misturas modificadas com borracha, os valores de M_R obtidos correspondem de 80 a 90% dos valores obtidos para a mistura de referência. Os valores de módulo de resiliência diminuíram com o aumento da porcentagem de borracha incorporada à mistura.

BROWN et al. (1997) apresentam as conclusões de um estudo realizado no estado da Georgia, nos Estados Unidos, a respeito da adição de borracha de pneu em misturas asfálticas recicladas e também em outros projetos de reforço de pavimentos. Resultados de ensaios indicam que a adição de borracha de pneu promove um grande aumento da viscosidade do cimento asfáltico, aumenta o teor ótimo de ligante da mistura e pode aumentar a resistência da mistura ao intemperismo. Os resultados dos ensaios de estabilidade e fluência Marshall e de resistência à tração das misturas modificadas com borracha são similares aos das misturas convencionais.

Outras constatações desse estudo indicam que a rigidez do cimento asfáltico modificado com borracha aumenta ao longo do tempo, com uma taxa maior que o cimento asfáltico de referência. Os resultados do ensaio de trilha de roda, em laboratório, e os resultados de campo indicam pequeno acúmulo de deformação permanente, tanto para as misturas modificadas com borracha, como para as convencionais. O concreto asfáltico reciclado pode ser empregado juntamente com a borracha, desde que seja utilizada em baixas quantidades. A mistura estudada era composta de 35% de material reciclado e 6% de borracha.

CHOUBANE et al. (1999) apresentam um artigo com as conclusões de uma avaliação, desenvolvida ao longo de dez anos, de três projetos experimentais desenvolvidos com misturas asfálticas modificadas com borracha de pneu, no Estado da Florida, nos Estados Unidos. A principal constatação deste estudo foi o aumento da resistência à formação de trincas dos revestimentos asfálticos modificados com borracha, especialmente nos quais foi utilizado o processo úmido de incorporação da borracha. O desempenho destas misturas, em relação à formação de trincas, foi superior ao das misturas convencionais e ao das misturas utilizando o processo seco de incorporação da borracha. O percentual ideal de borracha a ser empregado nas misturas, segundo as observações deste estudo, é de 10 a 15%.

3.4.7. Extração de cimento asfáltico

Os métodos convencionais para extração de cimento asfáltico não são eficientes para misturas asfálticas modificadas com borracha. As partículas de borracha que reagiram ou não com o cimento asfáltico não são completamente solúveis nos solventes

utilizados, somando-se, então, à massa de agregado mineral. Medidores nucleares de teor de asfalto ("nuclear asphalt content gauges") podem ser utilizados para este fim.

3.5. Uma breve discussão sobre a dosagem de CAUQ modificado com borracha de pneu

O teor ótimo de cimento asfáltico empregado nas misturas asfálticas é influenciado por vários fatores, sendo os principais: o tipo de agregado e a sua granulometria, o tipo de cimento asfáltico e a adição ou não de aditivos (polímeros, borracha de pneu, óleos extensores e outros). O método de dosagem de CAUQ usualmente empregado no Brasil e em grande parte do mundo é o método Marshall, composto de uma série de ensaios relativamente simples que fornecem, além do teor ótimo de cimento asfáltico, outros parâmetros de controle das misturas, como valores de volume de vazios, relação betume-vazios, vazios do agregado mineral, estabilidade Marshall e fluência Marshall.

Segundo EPPS (1994), algumas variações dos métodos de dosagem Hveen e Marshall são usados no projeto de misturas asfálticas densas empregando asfalto-borracha. Instituições como Grafcó¹⁰, Universidade de Nevada¹¹, Instituto de Transportes do Texas^{12,13}, FHWA¹⁴ e Centro Nacional de Tecnologia do Asfalto¹⁵, nos Estados

¹⁰CHEHOVITS, J. G. (1989). *Design methods for hot-mixed asphalt-rubber concrete paving material*. Presented at the National Seminar on Asphalt-Rubber.

¹¹STROUP-GARDINER, M.; KRUTZ, N.; EPPS, J. A. (1989). *Comparison of mix design methods for rubberized asphalt concrete mixtures*. Presented at the National Seminar of Asphalt-Rubber.

¹²ROBERTS, F. L.; LYTTON, R. L.; HOYT, D. M. (1986). *Criteria for asphalt-rubber concrete in civil airport pavements: mixture design*. Report n. DOT/FAA/PM-88/39, Texas Transportation Institute.

¹³ROBERTS, F. L.; LYTTON, R. L. (1987). *FAA mixture design procedure for asphalt-rubber concrete*. Presented at the 66th Annual Meeting of TRB, Washington, D. C.

¹⁴HEITZMAN, M. A. (1992). *State of the practice for design and construction of asphalt paving material with crumb rubber additive*. Report n. FHWA-AS-92-022, Office of Engineering, Pavement Division, Federal Highway Administration.

¹⁵ROBERTS, F. L.; KANDHAL, P. S.; BROWN, E. R.; DUNNING, R., L. (1989). *Investigation and evaluation of ground tire rubber in hot mix asphalt*. National Center of Asphalt Technology.

Unidos, desenvolveram diferentes procedimentos de dosagens para misturas densas com asfalto-borracha. Ensaio de estabilidade Marshall e Hvee e parâmetros de massa e volume constituem a base destes procedimentos. Soma-se a estes o método de dosagem (ROBERTS & LYTTON, 1987), desenvolvido pela FAA, nos Estados Unidos, para aplicação em pavimentos de aeroportos.

Os órgãos rodoviários costumam estabelecer limites, de acordo com as condições locais, para os valores de volume de vazios e de estabilidade e de fluência Marshall das misturas asfálticas, a fim de controlar a qualidade destas. O Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (DNER) estabelece as condições indicadas na Tabela 3.4 para o controle das misturas asfálticas empregadas na execução de camadas de rolamento.

Tabela 3.4. Condições exigidas das misturas asfálticas para camada de rolamento. [Fonte: DNER-ES 313/97 (1997)]

discriminação	camada de rolamento
porcentagem de vazios	3 a 5
relação betume/vazios	75 a 82
estabilidade (mínima, kgf)	350 (75 golpes)
	250 (50 golpes)
fluência (mm)	2,0 a 4,5

Para misturas empregando asfalto-borracha, o teor de cimento asfáltico costuma ser ligeiramente superior ao exigido por misturas empregando cimento asfáltico comum (EPPS, 1994; HANSON et al., 1994). Segundo EPPS (1994), o teor ótimo de misturas asfálticas com borracha costuma ser de 10 a 20% maior que o teor exigido para misturas convencionais. Uma regra prática é: se o teor de borracha adicionado ao cimento asfáltico for de 20%, o teor de ótimo será 20% maior que o teor obtido para um cimento asfáltico comum, isto é, 6% contra 5% da massa total de agregado. Segundo HANSON et al. (1994), este incremento se justifica pelo fato de o asfalto-borracha ser mais viscoso, de o filme asfáltico que recobre o agregado ser mais espesso e pela presença de partículas sólidas de borracha que não reagem com o ligante.

A adição de produtos como polímeros borracha de pneus, aumenta a viscosidade do cimento asfáltico, exigindo que as temperaturas de mistura dos componentes e compactação das misturas sejam sensivelmente mais altas que as normalmente utilizadas em misturas convencionais.

ROBERTS & LYTTON (1987) apontam duas razões para o aumento da temperatura de confecção dos corpos-de-prova de misturas modificadas com ligante asfalto-borracha em relação às misturas convencionais: (a) viscosidade do ligante alta, nas temperaturas normalmente empregadas na preparação de corpos-de-prova com misturas convencionais e (b) a dificuldade de envolver o agregado mineral com o ligante asfalto-borracha, que é mais elástico que outros cimentos asfálticos não modificados.

EPPS (1994) comenta também que o volume de vazios e a granulometria dos agregados da mistura dependem do teor de borracha e do processo de incorporação (seco ou úmido). Baixos teores de borracha no processo úmido apresentam efeito pequeno ou praticamente insignificante sobre o projeto das misturas, ao passo que praticamente qualquer teor adicionado à mistura pelo processo seco afeta o volume de vazios e a granulometria.

A "NCHRP Synthesis 198" (EPPS, 1994) apresenta os principais aspectos relativos à dosagem de concreto asfáltico usinado a quente modificado com borracha, de acordo com os procedimentos vigentes nos Estados Unidos na época da publicação deste trabalho. A Tabela 3.5 traz, em resumo, as principais recomendações quanto à dosagem de CAUQ modificado com borracha (processo úmido ou seco).

Nessa tabela são apontados apenas os parâmetros relativos ao método de dosagem Marshall. No trabalho original são apresentados também parâmetros do método de Hveem. A essas recomendações acrescentam-se as da FAA (ROBERTS & LYTTON, 1987). O método de dosagem da Grafco¹⁰ sugere que, durante o aquecimento em estufa, o ligante seja agitado e precauções sejam tomadas, para evitar a ocorrência de superaquecimento localizado do ligante.

No programa de pesquisa conduzido pela Universidade de Nevada¹¹, ficou constatado que, pelo método de dosagem Marshall, a presença de borracha reduz a estabilidade e a densidade, ao passo que aumenta os valores de fluência e de vazios do agregado mineral. Ficou constatado também que os valores de volume de vazios são similares, quando comparadas misturas asfálticas contendo borracha e misturas convencionais.

O Centro Nacional de Tecnologia do Asfalto¹⁵, dos Estados Unidos, recomenda a utilização dos métodos convencionais para a dosagem de CAUQ modificado com borracha, embora devam ser esperados valores baixos para a estabilidade e altos para a fluência, além de serem utilizados altos teores de cimento asfáltico.

Tabela 3.5. Recomendações quanto à dosagem de CAUQ modificado com borracha. [Fonte: EPPS (1994) e ROBERTS & LYTTON (1987)]

entidade	Grafco ¹⁰	Instituto de Transportes do Texas ^{12,13}	FHWA ¹⁴	FAA
características				
teor ótimo de ligante (%)	15 a 25% maior em relação ao CAP comum para teor de borracha entre 15 e 20% em peso	-	maior que o exigido para misturas convencionais	-
temperatura do ligante (°C)	177	-	-	191
temperatura do agregado (°C)	149	-	-	191
temperatura de mistura e compactação Marshall (°C)	138	191	maiores que as exigidas para misturas convencionais	191
número de golpes por face	-	75	-	75
tempo de resfriamento do corpo-de-prova, antes da extrusão (h)	4	o necessário para o corpo-de-prova alcançar temperatura ambiente	o necessário para o corpo-de-prova esfriar	o necessário para o corpo-de-prova alcançar temperatura ambiente
parâmetros de projeto da mistura	parâmetros do método Marshall ou Hveem	parâmetros do método Marshall	parâmetros do método Marshall ou Hveem	parâmetros do método Marshall
volume de vazios recomendado (%)	3 a 4	-	-	-
fluência (0,01")	24 (tráfego leve) 22 (tráfego médio) 20 (tráfego pesado)	-	-	-

Os métodos de dosagem sugeridos pela FHWA¹⁴ são o método Marshall e o Método de Hveem. No procedimento do método Marshall, a FHWA recomenda temperaturas de mistura e compactação mais altas que as empregadas em misturas convencionais. A estabilidade Marshall pode ser menor que a verificada para misturas convencionais e os valores de fluência, vazios do agregado mineral e teor de ligante podem ser maiores. Em geral, o teor de ligante para CAUQ modificado com borracha é maior e proporcional à porcentagem de borracha adicionada à mistura.

As características e resultados de algumas dosagens de misturas asfálticas empregando ligante asfalto-borracha, estudadas na pesquisa desenvolvida por AYRES & WITCZAK (1995), são apresentados na Tabela 3.6.

Tabela 3.6. Características e resultados de dosagens empregando ligante asfalto-borracha.
[Fonte: AYRES & WITCZAK (1995)]

tipo de asfalto	teor de asfalto	teor de borracha	% óleo extensor	densidade	E (N)	F (0,1 mm)	V _v (%)	VAM (%)	RBV (%)
AC-20 (ref.)	4,8	-	-	2,427	9.679	30,5	4,0	13,3	72,0
AC-10	6,1	10	1,0	2,393	11.227	42,5	3,4	16,6	79,5
AC-10	6,1	15	3,0	2,393	9.955	42,5	3,4	16,6	79,3
AC-10	6,3	20	7,0	2,384	9.701	40,0	3,6	16,5	79,5
AC-20	6,6	10	1,0	2,379	11.615	47,5	3,5	17,4	80,5
AC-20	6,6	15	3,0	2,387	11.770	50,0	3,3	17,2	80,7
AC-20	6,6	20	7,0	2,380	10.965	45,0	3,6	16,7	78,7

4. MATERIAIS, EQUIPAMENTOS E PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

4.1. Introdução

Neste capítulo são apresentados a descrição e a caracterização dos materiais empregados na execução das misturas, bem como os equipamentos utilizados e os procedimentos de dosagem das misturas pelo método Marshall, da moldagem dos corpos-de-prova usados na avaliação do desempenho das misturas e dos ensaios de resistência à tração por compressão diametral, módulo de resiliência por compressão diametral dinâmica e fluência por compressão uniaxial estática.

Este estudo laboratorial visa comparar o desempenho de dois CAUQs contendo ligante tipo asfalto-borracha e óleo extensor com o desempenho de uma mistura de referência, a fim de verificar a viabilidade de implantação destas misturas em trechos experimentais. Foi concebido como parte de um projeto a ser desenvolvido em conjunto pelo Departamento de Transportes da Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo (EESC-USP), pelo Departamento de Engenharia Civil da Universidade Estadual de Maringá (UEM), Maringá, PR, e pela Unidade de Negócios da Industrialização do Xisto (SIX) da Petrobrás de São Mateus do Sul, PR. Este projeto visa construir um trecho experimental empregando concreto asfáltico usinado a quente modificado com borracha e óleo extensor, a fim de obter maiores experiências com o uso de ligante asfalto-borracha em pavimentação asfáltica.

Inicialmente, este trecho seria executado na cidade de Maringá, PR. Porém, a ocorrência de agregados minerais de péssima qualidade em todas as pedreiras

daquele município inviabilizou a construção do trecho experimental e, consequentemente, a realização dos ensaios de laboratório empregando aquele mesmo agregado. O principal motivador desta decisão foi a alta probabilidade de o agregado mineral comprometer tanto os resultados dos ensaios de laboratório quanto o desempenho do trecho experimental, impossibilitando a avaliação da influência da borracha e do óleo extensor sobre o comportamento mecânico das misturas. Os ensaios de caracterização do agregado inicialmente escolhido, originário da pedreira da Prefeitura Municipal de Maringá e fornecido pelo Serviço Autônomo de Obras de Pavimentação (SAOP) daquela Prefeitura, estão apresentados a seguir (Tabela 4.1).

Decidiu-se, perante o cenário apresentado e devido à inexistência de agregados minerais de boa qualidade nas outras pedreiras daquele município, executar o trecho experimental em outra localidade. Porém, devido ao curto espaço de tempo disponível para a realização desta pesquisa e à dificuldade em encontrar outro local e parcerias para a efetivação do trecho experimental, foi selecionado um agregado disponível na região de São Carlos, SP, de forma a concluir esta pesquisa.

O enfoque deste trabalho deixou de ser, ao longo de seu desenvolvimento, o projeto de dosagem e a avaliação mecânica, em laboratório, das misturas a serem aplicadas na pista e foi direcionado para o projeto e a avaliação de misturas que utilizassem um agregado qualquer, mas de boa qualidade, para que fossem adquiridas maiores informações sobre o comportamento mecânico das misturas contendo asfalto-borracha e óleo de xisto.

Sob esta nova perspectiva, foi selecionado o agregado mineral da Pedreira Enderp, de Ribeirão Preto, SP, por se tratar de material reconhecidamente de qualidade superior ao fornecido pelo SAOP de Maringá. A caracterização destes agregados é apresentada a seguir.

Os ensaios de laboratório inicialmente previstos para esta pesquisa eram os de dosagem Marshall, fluência por compressão uniaxial estática e dinâmica ("static creep test" e "dynamic creep test"), resistência à tração por compressão diametral simples e módulo de resiliência por compressão diametral com carga repetida. Porém, alguns problemas no equipamento de ensaio do Laboratório de Estradas do Departamento de Transportes da EESC/USP não permitiram a realização do ensaio de fluência por compressão uniaxial dinâmica.

4.2. Materiais empregados nesta pesquisa

4.2.1. *Materiais granulares*

Os agregados utilizados no preparo das misturas foram obtidos por processo de britagem de rocha basáltica. Inicialmente, seriam utilizados os agregados minerais provenientes da pedreira da Prefeitura Municipal de Maringá e fornecidos pelo Serviço Autônomo de Obras de Pavimentação do município de Maringá (SAOP).

Para a caracterização física dos agregados minerais foram realizados os ensaios de abrasão Los Angeles, densidade real dos agregados gráudo e miúdo e adesividade do agregados gráudo e miúdo ao cimento asfáltico. Os resultados destes ensaios estão apresentados na Tabela 4.1 a seguir.

Conforme indicado na Tabela 4.1, nota-se que o agregado mineral fornecido pelo SAOP da Prefeitura Municipal de Maringá apresenta valor alto para a abrasão Los Angeles, embora o resultado seja inferior ao limite máximo de 40%, estabelecido pelos órgãos rodoviários. Os resultados dos ensaios de adesividade indicam que o agregado não apresenta características satisfatórias.

Por meio de uma avaliação visual deste material, observou-se que grande parte das partículas gráudas apresentava cores diversas. Durante a preparação das amostras para o ensaio de adesividade do agregado miúdo, notou-se trituração de parte das partículas, quando estas foram deixadas em recipiente com água e lavadas para a retirada de pó. Estes são indícios do alto grau de degradação destes agregados.

A Tabela 4.2 indica a faixa granulométrica inicialmente escolhida para este estudo, correspondente à faixa C do Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (DNER), conforme especificação DNER-ES 313/97. E apresenta, ainda, a distribuição granulométrica dos materiais granulares obtida por peneiramento, de acordo com as peneiras especificadas por esta norma, além da granulometria da composição final dos agregados. A Figura 4.1 apresenta a faixa granulométrica inicialmente adotada e a distribuição granulométrica da mistura de agregados.

Tabela 4.1. Resultados dos ensaios de caracterização física dos agregados minerais fornecidos pelo SAOP da Prefeitura Municipal de Maringá, PR.

ensaio		método	resultado
densidade real	agregado graúdo	DER/SP M3-61	2,959
	agregado miúdo		2,881
abrasão Los Angeles, %		DER/SP M35/64	28
adesividade do agregado graúdo ao CAP 40 (puro)		DNER ME 78-63	não satisfatória
adesividade do agregado miúdo ao CAP 40 (puro)		DNER ME 79-63	má
adesividade do agregado graúdo ao CAP 40 + 12% borracha + 10% AR-5		DNER ME 78-63	não satisfatória
adesividade do agregado miúdo ao CAP 40 + 12% borracha + 10% AR-5		DNER ME 79-63	má
adesividade do agregado graúdo ao CAP 40 + 20% borracha + 15% AR-5		DNER ME 78-63	não satisfatória
adesividade do agregado miúdo ao CAP 40 + 20% borracha + 15% AR-5		DNER ME 79-63	má

Convém ressaltar, ainda, que a análise granulométrica dos agregados minerais fornecidos pelo SAOP foi efetuada com base no quarteamento da amostra recebida e que as porcentagens de cada material foram determinadas pelo método de Huthfocks, sendo a mistura final composta por 37% de brita 1 e 63% de pedrisco e pó de pedra.

A composição granulométrica da mistura foi obtida por separação dos agregados nas frações correspondentes a cada uma das peneiras da especificação e posterior misturação nas proporções apresentadas anteriormente, considerando as frações de cada peneira. Porém, em face à má qualidade do agregado mineral fornecido pelo SAOP, preferiu-se descartar estes materiais e selecionar outro, a fim de não comprometer os resultados desta pesquisa.

Tabela 4.2. Limites da faixa granulométrica C do DNER (DNER-ES 313/97) e composições granulométricas dos agregados minerais e da mistura obtida (material fornecido pelo SAOP da Prefeitura Municipal de Maringá, PR).

peneiras (abertura em mm)	% passada			
	brita 1	pedrisco + pó de pedra	faixa C (DNER)	mistura final
19,1	100,00	100,00	100	100,00
12,7	99,78	100,00	85 – 100	99,92
9,5	87,13	100,00	75 – 100	95,24
4,75	9,68	100,00	50 – 85	66,58
2,00	0,58	77,73	30 – 75	49,00
0,42	0,43	38,86	15 – 40	24,64
0,175	0,41	25,84	8 – 30	16,43
0,074	0,38	13,07	5 – 10	8,38
fundo	0,00	0,00	0	0,00

Curvas granulométricas

Figura 4.1. Curvas granulométricas dos agregados minerais: faixa "C" DNER e distribuição granulométrica da mistura final (descartada).

Os novos agregados minerais empregados neste trabalho são provenientes da Pedreira Inderp, do município de Ribeirão Preto, SP. A Tabela 4.3 apresenta a caracterização física destes agregados.

Após a mudança de agregado mineral, optou-se pela utilização da faixa “C” do Departamento de Estradas de Rodagem de São Paulo (DER/SP). A curva granulométrica da mistura final corresponde ao centro desta faixa. A Tabela 4.4 apresenta as peneiras e os intervalos correspondentes à faixa granulométrica “C” do DER/SP (DER/SP, 1991) bem como a distribuição granulométrica final da mistura. A Figura 4.2 mostra a faixa granulométrica adotada e a distribuição granulométrica final da mistura utilizada neste estudo.

Tabela 4.3. Resultados dos ensaios de caracterização física dos agregados minerais da pedra Inderp, de Ribeirão Preto, SP.

ensaio		método	resultado
densidade real	agregado graúdo	DER/SP M3-61	2,833
abrasão Los Angeles, %		DER/SP M35/64	13
adesividade do agregado graúdo ao CAP 40 (puro)		DNER ME 78-63	não satisfatória
adesividade do agregado miúdo ao CAP 40 (puro)		DNER ME 79-63	má
adesividade do agregado graúdo ao CAP 40 + 12% borracha + 10% AR-5		DNER ME 78-63	não satisfatória
adesividade do agregado miúdo ao CAP 40 + 12% borracha + 10% AR-5		DNER ME 79-63	má
adesividade do agregado graúdo ao CAP 40 + 20% borracha + 15% AR-5		DNER ME 78-63	não satisfatória
adesividade do agregado miúdo ao CAP 40 + 20% borracha + 15% AR-5		DNER ME 79-63	satisfatória

O resultado do ensaio de abrasão Los Angeles para o agregado da pedra Inderp indica que este material é melhor que o analisado anteriormente. Embora os ensaios tenham indicado adesividade má e não satisfatória na maioria dos casos, preferiu-se empregar este agregado neste trabalho, uma vez que este material se mostrou adequado para a execução de misturas asfálticas, como pode ser constatado em outras pesquisas (p. ex.: TAIRA, 2001).

Tabela 4.4. Limites da faixa granulométrica "C" do DER/SP e composição granulométrica da mistura final.

peneiras (mm)	faixa C - DER/SP (% passada)		
	limite inferior	limite superior	centro da faixa
19,0	100	100	100,0
12,5	85	100	92,5
4,8	50	80	65,0
2,0	30	65	47,5
0,42	15	40	27,5
0,175	10	25	17,5
0,075	6	10	8,0

Curvas granulométricas

Figura 4.2. Faixa granulométrica C do DER/SP (DER/SP, 1991) e curva granulométrica da mistura obtida.

4.2.2. Cimentos asfálticos

Neste estudo foram empregados três cimentos asfálticos de petróleo (CAP):

- CAP de referência: CAP 40 (100%);
- CAP 40 modificado com borracha e óleo extensor de borracha (78/10/12%)

- CAP 40 modificado com borracha e óleo extensor de borracha (65/15/20%).

Estes cimentos asfálticos foram fornecidos pela SIX-Petrobras. O CAP escolhido para a realização desta pesquisa é o CAP 40, por ser apropriado para regiões de clima quente e por ser disponível na região de São Mateus do Sul.

O teor de borracha adicionado ao cimento asfáltico foi determinado pela SIX-Petrobras, considerando os teores normalmente empregados neste produto nos Estados Unidos. O teor de óleo extensor de borracha adicionado ao cimento asfáltico também foi determinado pela SIX-Petrobras, segundo critérios próprios.

A fim de efetuar a caracterização física dos cimentos asfálticos empregados neste estudo, foram realizados os ensaios de viscosidade absoluta, nas temperaturas de 135, 155, 175, 177 e 190°C, cujos resultados foram convertidos para viscosidade Saybolt-Furol, viscosidade absoluta a 60°C, ponto de fulgor, penetração, ponto de amolecimento e densidade. A Tabela 4.5, a seguir, apresenta os resultados destes ensaios e a Tabela 4.6 apresenta as especificações para o CAP 40, segundo o Regulamento Técnico 01/92, Rev. 02-DNC (IBP, 1994).

Tabela 4.5. Resultados dos ensaios de caracterização física dos cimentos asfálticos. [Fonte: SIX-Petrobras]

característica		método	CAP 40 (puro)	CAP 40 + 12% borracha + 10% AR-5	CAP 40 + 20% borracha + 15% AR-5
viscosidade Saybolt-Furol (sSF) (viscosidade absoluta convertida em viscosi- dade Saybolt-Furol)	135°C	MB - 827	259,42	444,74	-
	155°C		103,21	189,58	825,33
	175°C		-	-	404,09
	177°C		45,08	95,01	368,94
	190°C		-	-	281,59
viscosidade absoluta a 60°C, cP		MB - 827	301.101	-	-
penetração, 25°C, 100 g, 5s, 1/10 mm		MB - 107	38,0	77,5	79,0
ponto de amolecimento, °C		MB - 164	54,0	48,2	52,0
ponto de fulgor, °C		MB - 50	> 300	> 300	> 300
densidade (picnômetro)		MB - 387	1,004	1,033	1,039
índice de suscetibilidade térmica (IST)*		-	-0,9	- 0,6	+ 0,5

$$*IST = \frac{500 \log PEN + 20PA - 1951}{120 - 50 \log PEN + PA}, \text{ sendo PEN a penetração, em 0,1 mm, e PA o ponto de}$$

amolecimento, em °C.

Tabela 4.6. Especificação para o CAP 40 – classificação por viscosidade – Regulamento Técnico 01/92, Rev. 02, DNC. [Fonte: IBP (1994)]

característica	método	CAP 40
viscosidade Saybolt-Furol (sSF)	135°C	170 mín
	177°C	40 a 150
viscosidade absoluta a 60°C, P	MB - 827	4 000 a 8 000
penetração, 25°C, 100 g, 5s, 1/10 mm	MB - 107	30 mín
ponto de amolecimento, °C	MB - 164	-
ponto de fulgor, °C	MB - 50	235 mín
índice de suscetibilidade térmica (IST)	-	-1,5 a +1,0

A Figura 4.3, a seguir, mostra a variação da viscosidade Saybolt-Furol dos três cimentos asfálticos em função da temperatura de ensaio. Conforme pode ser visto, a presença de borracha impõe um aumento significativo nos valores de viscosidade dos ligantes analisados. Este aumento é mais pronunciado no cimento asfáltico com 20 % de borracha e 15% de óleo de xisto. Os outros dois apresentam curvas paralelas e relativamente próximas.

Figura 4.3. Variação da viscosidade Saybolt-Furol com a temperatura.

Foi verificada também a influência da borracha sobre os resultados do ensaio de penetração e de ponto de amolecimento. A presença de borracha e de óleo extensor provocou aumento da penetração e diminuição do ponto de amolecimento. Os valores do índice de suscetibilidade térmica para os três cimentos asfálticos enquadraram-se na faixa de (-1,5) a (+1,0).

Na preparação do ligante asfalto-borracha foi utilizado um misturador de laboratório de alto cisalhamento com tacógrafo, da marca Silverson (Figura 4.4). Trata-se de um misturador multifunção de haste vertical capaz de misturar, emulsificar, homogeneizar, desintegrar, reduzir partículas suspensas, solubilizar e gelificar soluções e suspensões. Este equipamento é capaz de produzir misturas em diferentes graus de severidade de cisalhamento devido a capacidade de variação da rotação de até 12.000 rpm.

O tempo de mistura da borracha com o cimento asfáltico foi de 120 min, à temperatura de 200°C.

Figura 4.4. Misturador empregado na preparação do asfalto-borracha.

4.2.3. Borracha

A borracha empregada neste estudo foi fornecida pela empresa B. S. Colway, de Curitiba, e apresenta a composição granulométrica indicada na Tabela 4.7.

É resultante da lixação de carcaças de pneus automotivos a serem remoldados (parte lateral e interna). A composição da borracha é praticamente 100% de borracha sintética, normalmente usada nos pneus de carros de passageiros.

Tabela 4.7. Composição granulométrica da borracha. [Fonte: SIX-Petrobras]

peneiras (mm)	% retida
1,41	6,9
1,00	10,4
0,84	7,5
0,59	25,0
0,297	28,4
0,177	14,5
fundo	7,3

Segundo MARTIGNONI (2001)¹, a produção da BS Colway é de 48 t/mês e o custo do produto, que é coletado no sistema de exaustão da remoldadora, é de 0,1 R\$/kg. Atualmente toda a produção é vendida para a Holanda.

4.2.4. Óleo extensor de borracha

Os óleos extensores são normalmente utilizados em misturas do cimento asfáltico com a borracha, pois estes dois materiais, na maioria das vezes, são incompatíveis. O óleo extensor de borracha (AR-5), empregado neste estudo, é extraído do xisto betuminoso e é produzido pela SIX-Petrobras. Trata-se de uma fração pesada do óleo de xisto, rica em maltenos e com baixo teor de asfaltenos e, devido à ocorrência de até 37% em peso de óleos aromáticos, presta-se bem, segundo o produtor, como óleo extensor de borracha. A Tabela 4.8 apresenta algumas características deste material:

¹MARTIGNONI, B. (2001). SIX-Petrobras, São Mateus do Sul, PR. *Comunicação pessoal*.

Tabela 4.8. Resultados dos ensaios de caracterização do óleo extensor de borracha AR-5.

[Fonte: SIX-Petrobras]

características		método de ensaio (ASTM)	AR-5
ponto de anilina ¹ , °C		D 611	31,5
viscosidade absoluta, cSt	37,8°C (100°F)	D 2171	2 232
	40°C (104°F)		1 756
densidade		-	0,9969
VGC ²		D 2501	0,2076
viscosidade Saybolt Furol, sSF		MB-517	15,32
asfaltenos, % em peso		D 2007	4,5
ponto de fluidez ³ , °C		D 97	+12
ponto de fulgor, °C		MB-50	232
carbono aromático, NMR ⁴ %		-	36,9

¹Indica a capacidade de um óleo de dissolver certos materiais com os quais entra em contato. Corresponde à menor temperatura na qual o óleo é completamente miscível com igual volume de anilina. Produtos com alto ponto de anilina são ricos em hidrocarbonetos parafínicos e pobres em naftênicos e aromáticos.

²“Viscosity-gravity constant” (VGC): é uma estimativa da composição de hidrocarbonetos de um óleo. É obtida, segundo ASTM D 2501, pela seguinte equação: $VGC \text{ a } 37,8^{\circ}\text{C} (100^{\circ}\text{F}) = (10G - 1,0752\log(V-38))/10 - \log(V-38)$, onde: G = densidade a 15,6°C (60°F), e V = viscosidade Saybolt-Furol a 37,8°C (100°F). Valores de VGC próximos de 0,80 indicam óleo de características parafínicas e valores próximos de 1,00 indicam óleos com preponderância de hidrocarbonetos aromáticos.

³É a temperatura em que um óleo submetido a um processo de resfriamento pára de fluir. É um indicativo da sua capacidade de ser bombeado.

⁴ “Nuclear magnetic resonance” – ressonância magnética nuclear.

4.3. Equipamentos utilizados

Para a efetivação dos ensaios de laboratório, foram empregados os seguintes equipamentos:

- compactador Marshall mecânico;
- prensa VERSATESTER 30M, utilizada nos ensaios de fluência e estabilidade de Marshall e resistência à tração por compressão diametral;
- prensa, dotada de sistema pneumático de aplicação de carga, para realização dos ensaios de módulo de resiliência por compressão diametral dinâmica;
- sistema de aquisição automática de dados, composto de uma célula de carga de marca PT, com capacidade para 20 kN e LVDTs da marca Transdu-tec, com curso de 50 mm, e também condicionadores de sinal da marca Transdu-tec, computador Pentium I, 166 MHz, 2,1 Gb de disco rígido, 80 Mb de memória RAM e placa National com conversor AD/DA (analógico-digital/digital-analógico);
- prensa de adensamento, para realização dos ensaios de fluência por compressão uniaxial estática.

4.4. Procedimentos experimentais

Para a efetivação dos objetivos deste estudo, desenvolveu-se o diagrama dos procedimentos experimentais empregados, visto a seguir (Figura 4.5). Após a caracterização dos materiais e peneiramento dos agregados minerais, foram realizadas as dosagens das três misturas asfálticas, segundo o método Marshall. Na sequência, foram moldados os corpos-de-prova para os ensaios de avaliação do desempenho das misturas. Seguiram, então, a realização destes ensaios, o tratamento dos resultados e as conclusões.

Figura 4.5. Diagrama do procedimento experimental empregado.

4.5. Dosagem das misturas asfálticas

Neste estudo foram confeccionadas três misturas asfálticas, a saber:

- mistura 1 (M1): 100% CAP 40 (mistura de referência);
- mistura 2 (M2): 78% CAP 40 + 10% AR-5 (óleo extensor) + 12% borracha;
- mistura 3 (M3): 65% CAP 40 + 15% AR-5 + 20% borracha.

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. Uma estimativa inicial deste teor foi efetuada pelo método da superfície específica DER/SP - M 148-60 (DER, 1960).

4.5.1. Estimativa do teor ótimo de cimento asfáltico

De acordo com o método da superfície específica, a superfície específica do agregado mineral é calculada por:

$$S = \frac{0,17G + 0,33g + 2,30A + 12,00a + 135,00f}{100} \quad (4.1)$$

em que:

S = superfície específica do agregado, em m^2/kg ;

G = porcentagem retida na peneira 9,52 mm;

g = porcentagem passada na peneira 9,52 mm e retida na 4,76 mm;

A = porcentagem passada na peneira 4,76 mm e retida na 0,297 mm;

a = porcentagem passada na peneira 0,297 mm e retida na 0,074 mm;

f = porcentagem passada na peneira 0,074 mm.

O teor de cimento asfáltico é calculado pela seguinte fórmula:

$$T_{CA} = m\sqrt[5]{S} \quad (4.2)$$

em que:

T_{CA} = teor de cimento asfáltico em relação à massa do agregado mineral, em %;

m = módulo de riqueza em asfalto, variável de 3,75 a 4,00 para pavimentos rodoviários (adota-se 3,5 quando se exige nas capas de rolamento máxima resistência à deformação por compressão e 4,0 para capas que necessitam ter maior flexibilidade);

O teor de cimento asfáltico corrigido é:

$$T'_{CA} = \frac{2,65T_{CA}}{\delta_{am}} \quad (4.3)$$

sendo:

T'_{CA} = teor de cimento asfáltico corrigido devido à densidade do agregado mineral, em %;

δ_{am} = densidade real do agregado mineral.

A porcentagem de cimento asfáltico em relação à mistura em massa (P_{CA}) é dada pela fórmula:

$$P_{CA} = \frac{100T'_{CA}}{100 + T'_{CA}} \quad (4.4)$$

O teor ótimo estimado para o agregado mineral empregado neste trabalho resultou 5,53%. Para a dosagem da mistura com CAP 40 puro foram escolhidos os seguintes teores de cimento asfáltico: 4,5; 5,0; 5,5; 6,0 e 6,5%. Para a dosagem das misturas com ligante asfalto-borracha preferiu-se utilizar os teores de 5,00; 5,50; 6,00; 6,50 e 7,00%, já que o teor ótimo costuma ser maior quando é adicionada borracha.

4.5.2. Temperatura dos componentes da mistura e de misturação e compactação

Segundo DER/SP (1991), ao ser adicionado ao agregado, o cimento asfáltico deve estar entre 135°C e 177°C, mas a faixa mais adequada deverá ser determinada em função da relação *temperatura x viscosidade* e será aquela na qual o CAP apresente viscosidade Saybolt-Futol entre 75 e 150 sSF. A temperatura apropriada é a que corresponde à viscosidade 85 ± 10 sSF. Quanto à compactação, este manual recomenda que a temperatura de compactação das misturas seja aquela em que o CAP apresente viscosidade Saybolt-Futol de 140 ± 15 sSF. A Tabela 4.9 apresenta as temperaturas empregadas nas dosagens das três misturas.

Tabela 4.9. Temperaturas dos componentes das misturas e de misturação e compactação.

temperatura (°C)	M1	M2	M3
agregado mineral	168	180	190
cimento asfáltico	155	170	180
misturação e compactação	166	175	185

4.5.3. Moldagem dos corpos-de-prova

Para cada dosagem, foram confeccionados 15 corpos-de-prova, 3 para cada teor de cimento asfáltico, de acordo com o método Marshall (ABNT, 1993), utilizando energia de compactação de 75 golpes em cada face.

A desmoldagem foi efetuada após resfriamento dos corpos-de-prova ao ar, conforme recomendação encontrada na literatura, ocorrendo em torno de 5 h após o término da moldagem.

4.6. Descrição dos ensaios realizados

4.6.1. Dosagem Marshall

Após a confecção e desmoldagem dos corpos-de-prova, foram feitas a determinação da massa ao ar e na condição imersa e a cubicagem dos corpos de prova e, posteriormente, foram realizados os ensaios de estabilidade e fluência Marshall, empregando a prensa VERSATESTER 30M, com ajuste automático de velocidade e medidor de deslocamento com precisão de 0,01". Os corpos-de-prova foram aquecidos, antecipadamente, durante 20 min, em banho-maria, a 60°C.

Os parâmetros determinados na dosagem Marshall são: estabilidade Marshall (EM), fluência Marshall (FM), densidade aparente (D_a), densidade máxima teórica (D_t), volume de vazios (V_v), vazios do agregado mineral (VAM) e relação betume-vazios (RBV). Eles são calculados da seguinte forma:

a) Densidade aparente (D_a):

$$D_a = \frac{M_{AR}}{M_{AR} - M_{IMERSA}} \quad (4.5)$$

sendo:

M_{AR} = massa ao ar do corpo-de-prova;

M_{IMERSA} = massa imersa do corpo-de-prova.

b) Densidade máxima teórica (D_t):

$$D_t = \frac{100}{\frac{\%ag}{d_{ag}} + \frac{\%af}{d_{af}} + \frac{\%f}{d_f} + \frac{\%b}{d_b}} \quad (4.6)$$

onde:

%ag, %af, %f e %b = porcentagem de agregado graúdo, miúdo, filer e cimento asfáltico, respectivamente;

d_{ag} , d_{af} , d_f e d_b = densidade real do agregado graúdo, miúdo, filer e do cimento asfáltico, respectivamente.

c) Volume de vazios (V_v):

$$V_v = 100 \left(\frac{D_t - D_a}{D_t} \right) \quad (4.7)$$

d) Volume de vazios preenchidos pelo cimento asfáltico (V_b):

$$V_b = \frac{D_a \cdot \%b}{d_b} \quad (4.8)$$

e) Vazios do agregado mineral (VAM):

$$VAM = V_v + V_b \quad (4.8)$$

f) Relação betume-vazios (RBV):

$$RBV = \frac{100 V_b}{VAM} \quad (4.9)$$

O ensaio Marshall fornece curvas de massa específica, volume de vazios, relação betume-vazios, estabilidade Marshall e fluência Marshall em função dos teores de ligante asfáltico. O teor ótimo de cada mistura foi escolhido dentre uma faixa de valores de teor de ligante obtida com base nas especificações para projeto de misturas asfálticas do Anexo II do Manual de Normas de Pavimentação do DER/SP (DER, 1991), reproduzidas na Tabela 4.10. Nos projetos efetuados nesta pesquisa, optou-se, por uma questão de uniformização, adotar o teor ótimo de cimento asfáltico correspondente ao volume de vazios igual a 4%.

Tabela 4.10. Condições exigidas das misturas asfálticas para camada de rolamento. [Fonte: DER (1991)]

discriminação	camada de rolamento
volume de vazios	3 a 5
relação betume/vazios	75 a 85
estabilidade (mínima, kgf)	750 (75 golpes – tráfego pesado) 500 (50 golpes – tráfego médio)
fluência (0,01")	8,0 a 16,0

Os corpos-de-prova empregados nos ensaios de resistência à tração por compressão diametral, módulo de resiliência por compressão diametral dinâmica e fluência por compressão uniaxial estática foram moldados no teor ótimo referente a cada uma das misturas.

4.6.2. Ensaio de resistência à tração por compressão diametral

Este ensaio foi efetuado segundo o procedimento da norma DNER-ME 138/94, descrito no item 2.4.2.1 (pág.27) desta dissertação. Foi empregada a mesma prensa utilizada nos ensaios de estabilidade e fluência Marshall, promovidas as devidas alterações no dispositivo de aplicação de carga. Os ensaios foram realizados à temperatura de 25°C.

4.6.3. Ensaio de módulo de resiliência por compressão diametral com carga repetida

Este ensaio foi realizado segundo o procedimento da norma DNER-ME 133/94, descrito no item 2.4.3.2 (pág. 35) desta dissertação. A temperatura empregada foi a de 25°C. O equipamento utilizado neste ensaio está ilustrado na Figura 4.6 a seguir. Trata-se de uma prensa dotada de sistema pneumático de aplicação de carga, feita por um pistão, acionado remotamente por um programa computacional, também res-

ponsável pelo registro das leituras de carga e deslocamentos, feitos por uma célula de carga e um conjunto de LVDTs, respectivamente.

Figura 4.6. Esquema ilustrativo do equipamento utilizado no ensaio de módulo de resiliência.

Os dados obtidos nestes ensaios foram processados em planilha eletrônica, obtendo-se curvas carga x tempo e deformação x tempo, os quais foram utilizados no cálculo do módulo de resiliência. Para cada ensaio, foram calculados os valores do módulo de resiliência nos seguintes instantes: 299, 300, 301, 399, 400, 401, 497, 498, 499 e 500 s. O valor final do módulo de resiliência para cada corpo-de-prova é a média aritmética das determinações nestes 9 pontos. Os resultados do módulo de resiliência para cada mistura corresponde à média aritmética dos valores obtidos para um conjunto de 4 corpos-de-prova.

Todos os corpos-de-prova ensaiados foram submetidos a um segundo carregamento, com aplicação de carga na direção perpendicular à que foi aplicada inicialmente, a fim de confirmar os valores obtidos.

4.6.4. Ensaio de fluência por compressão uniaxial estática

Este ensaio foi realizado conforme recomendações descritas no item 2.4.4.5 (pág. 50) desta dissertação. Foram empregados temperatura de 40°C e dois níveis diferentes de tensão de compressão axial: 0,4 e 0,7 MPa. A tensão de 0,4 MPa é a mesma sugerida por LITTLE et al. (1993) e a de 0,7 MPa é sugerida por EL HUSSEIN & YUE (1994). Tais níveis de tensão refletem, segundo estes autores, as condições de solicitação às quais um revestimento asfáltico está normalmente submetido na pista.

Optou-se pela realização de um pré-carregamento, utilizando 100% da carga de compressão, com duração de 2 min, seguido de 5 min de repouso, a fim de promover o pré-condicionamento dos corpos-de-prova. Em seguida, promoveu-se a aplicação de carga durante o período de 60 min, seguido de repouso de 15 min, durante os quais foram feitas medidas de deslocamento vertical em intervalos de tempo preestabelecidos.

Os dados do ensaio foram registrados manualmente e posteriormente processados em planilha eletrônica, obtendo-se curvas de deformações axiais (verticais) em função do tempo. Os resultados obtidos representam a média de 4 corpos-de-prova para as misturas M1 e M2 e de 3 para M3.

O equipamento utilizado neste ensaio está ilustrado na Figura 4.7 a seguir. Trata-se de uma prensa de adensamento, comumente utilizada em Mecânica dos Solos, instalada dentro de uma cabine de madeira. Esta prensa possui um braço cujo coeficiente de multiplicação da carga é igual a 11,2; assim, para que fosse aplicada a tensão de 0,7 MPa no corpo-de-prova, dividia-se a carga necessária por 11,2, obtendo-se o contrapeso necessário para provocar esta solicitação. Um conjunto composto de 6 resistências elétricas, de 200 W cada, é responsável pelo aquecimento do ambiente, cujo controle de temperatura é feito por um par termoelétrico. Um ventilador foi utilizado para promover a circulação interna do ar, homogeneizando a temperatura do ambiente.

O condicionamento térmico dos corpos-de-prova, anterior à realização dos ensaios, foi feito em estufa à mesma temperatura dos ensaios, durante um período mínimo de 6 h. Os corpos-de-prova tiveram suas bases polidas com lixa para metal nº 100 e lubrificadas com uma camada fina de vaselina, a fim de reduzir ao máximo o atrito entre o atuador e a superfície do corpo-de-prova.

Figura 4.7. Esquema ilustrativo da prensa de adensamento utilizada no ensaio de fluência por compressão uniaxial estática.

4.7. Programa computacional para operação da prensa pneumática e para aquisição automática dos dados

Para a efetivação dos ensaios de módulo de resiliência por compressão diametral dinâmica, foi desenvolvido um programa computacional em linguagem “Labview for Windows” da “National Instruments Corp.” (1996). Este programa gerencia a aplicação e retirada de carga, que é gerada por um sistema pneumático, e controla a aquisição automática e o registro de dados, permitindo o realização de leituras de deslocamentos, por meio de LVDTs, e da força, por meio de uma célula de carga, ao longo do tempo em intervalos de fração de segundo.

A placa utilizada é uma PC LPM-16, da “National Instruments Corp.”, contendo 16 entradas analógicas, 8 entradas digitais e 8 saídas digitais, contando com uma razão máxima de amostragem de 50 kHz e uma resolução de 12 bits.

O programa permite uma taxa de aquisição de 1000 dados por segundo, registrando-os em formato texto, que podem ser posteriormente tratados em planilha eletrônica, efetuando-se as devidas conversões. Na Figura 4.9 é apresentada a tela do programa, na qual podem ser notados os dados de entrada do ensaio de módulo de resiliência por compressão diametral dinâmica.

4.8. Análise dos resultados dos ensaios

A análise dos resultados dos ensaios foi feita com base nos valores de média, desvio padrão e coeficiente de variação; também foi aplicado o teste de Grubbs, para identificação de “outliers”, e realizado um estudo da repetibilidade dos ensaios.

O teste de Grubbs (GRUBBS, 1969)¹ é uma ferramenta estatística empregada para detectar “outliers” em conjunto de resultados de ensaios e é aplicável apenas para resultados cuja distribuição se aproxime da normal. Esta ferramenta detecta um “outlier” por vez; após a retirada deste valor incorreto, novas iterações são realizadas, até que não reste mais nenhum “outlier”.

¹GRUBBS, F. (1969). Procedures for detecting outlying observations in samples. *Technometrics*, v. 11, n. 1, p. 1-21.

Figura 4.9. Ilustração da tela do programa computacional que gerencia o ensaio de módulo de resiliência por compressão diametral dinâmica.

O teste de Grubbs é definido segundo as hipóteses a seguir:

H_0 : não há “outliers” entre os resultados;

H_a : há pelo menos um “outlier” entre os resultados.

Inicialmente, deve-se verificar, dentre os dados de um mesmo tratamento, quais são os valores máximo e mínimo. De posse destes valores, calcular a estatística “G”, definida como:

$$G = \frac{\max |y_i - \bar{y}|}{s} \quad (4.10)$$

onde:

y_i = valores máximo e mínimo dentro do conjunto de resultados de um mesmo tratamento;

$\bar{y}$ = média dos resultados de um mesmo tratamento;

s = desvio padrão dos resultados de um mesmo tratamento.

A estatística “G” deve ser comparada com o valor de “ $G_{\text{CRÍTICO}}$ ”, obtido da Tabela 4.11, a seguir, em função do nível de confiança adotado. Um resultado será considerado “outlier” quando $G > G_{\text{CRÍTICO}}$.

Os resultados da aplicação do teste de Grubber aos resultados dos ensaios realizados nesta pesquisa estão indicados no Anexo B, nas Tabelas B2, B4 e de B6 a B12.

O estudo da repetibilidade dos ensaios de laboratório visa determinar se um ensaio é repetível ou não, para um determinado nível de confiança. Esta análise é feita com base na norma ISO 5725-2/94, que estabelece um critério de cálculo da repetibilidade. Um resumo deste critério pode ser encontrado no Apêndice A, ao final deste relatório. No Anexo B são apresentadas as planilhas de cálculo obtidas da aplicação deste critério aos resultados dos ensaios realizados nesta pesquisa (Tabelas de C1 a C26).

Tabela 4.8. Valores de $G_{\text{CRÍTICO}}$. [Fonte: GRUBBS (1969)]

número de observações	nível de confiança (%)		
	5	2,5	1,0
3	1,15	1,15	1,15
4	1,46	1,48	1,49
5	1,67	1,71	1,75
6	1,82	1,89	1,94
7	1,94	2,02	2,10
8	2,03	2,13	2,22
9	2,11	2,21	2,32
10	2,18	2,29	2,41
11	2,23	2,36	2,48
12	2,29	2,41	2,55
13	2,33	2,46	2,61
14	2,37	2,51	2,66
15	2,41	2,55	2,71
16	2,44	2,59	2,75
17	2,47	2,62	2,79
18	2,50	2,65	2,82
19	2,53	2,68	2,85
20	2,56	2,71	2,88
21	2,58	2,73	2,91
22	2,60	2,76	2,94
23	2,62	2,78	2,96
24	2,64	2,80	2,99
25	2,66	2,82	3,01
30	2,75	2,91	
35	2,82	2,98	
40	2,87	3,04	
45	2,92	3,09	
50	2,96	3,13	
60	3,03	3,20	
70	3,09	3,26	
80	3,14	3,31	
90	3,18	3,35	
100	3,21	3,38	

5. RESULTADOS OBTIDOS E ANÁLISE

5.1. Introdução

Neste capítulo são apresentados os resultados dos ensaios Marshall, resistência à tração por compressão diametral simples, módulo de resiliência por compressão diametral com carga repetida e fluência por compressão uniaxial estática, além da análise estatística dos dados obtidos, envolvendo testes de hipótese e cálculo da repetibilidade, e da discussão dos resultados.

Do ensaio Marshall são indicados os valores de densidade aparente (D_a), volume de vazios (V_v), vazios do agregado mineral (VAM), relação betume-vazios (RBV), fluência (FM) e estabilidade (EM), em função do teor de cimento asfáltico. Os resultados dos ensaios Marshall referem-se, sempre, à média dos valores obtidos para três corpos-de-prova moldados no mesmo teor de cimento asfáltico ou de apenas dois corpos-de-prova, quando são retirados os “outliers”.

Dos ensaios de tração indireta por compressão diametral estática e compressão diametral com carga repetida são apresentados os resultados, na temperatura de 25°C, de resistência à tração e de módulo de resiliência, respectivamente, das misturas no seu teor ótimo de cimento asfáltico, determinado nas dosagens Marshall. Também são listadas algumas das características físicas dos corpos-de-prova utilizados nos ensaios.

Dos ensaios de fluência por compressão uniaxial estática, realizados à temperatura de 40°C, são mostrados os valores de deformação total, deformação recuperável e não-recuperável, recuperação elástica, módulo de fluência e inclinação da curva de fluência das misturas no seu teor ótimo de cimento asfáltico, conforme as dosagens

Marshall executadas. Conjuntamente com estes resultados são mostradas algumas características físicas dos corpos-de-prova ensaiados.

O capítulo de Anexos traz os resultados detalhados dos ensaios realizados nesta pesquisa, bem do teste para identificação de “outliers” e o estudo da repetibilidade. Para isto, ver Anexos A, B e C.

5.2. Dosagem Marshall

As Tabelas 5.1, 5.2 e 5.3 mostram os valores médios obtidos nas dosagens das misturas M1, M2 e M3. As Figuras 5.1, 5.2 e 5.3 apresentam os gráficos de densidade aparente (D_a), volume de vazios (V_v), relação betume-vazios (RBV), fluência Marshall (FM) e estabilidade Marshall (EM) para estas três misturas.

Os dados detalhados das três dosagens estão apresentados no Anexo B, nas Tabelas B1, B3 e B5, juntamente com as tabelas que mostram os resultados do teste de Grubber para identificação de “outliers” (Tabelas B2, B4 e B6). Os “outliers” estão indicados, nestas tabelas, pelos valores formatados em negrito e *itálico*, sendo o número do corpo-de-prova problemático indicado com um asterisco. Estes valores foram eliminados dos cálculos, de maneira a melhorar a forma das curvas dos parâmetros Marshall, embora nenhum deles tivesse fornecido valores da estatística G maiores que $G_{CRÍTICO}$. Porém, como pode ser observado, todos os pontos excluídos têm G igual a $G_{CRÍTICO}$, com exceção do corpo-de-prova número 4, da mistura M1, o qual foi moldado, por engano, com massa maior que a padrão.

Tabela 5.1. Resultados do ensaio Marshall para a mistura convencional ou M1 (CAP 40).

teor de asfalto (%)	D_a	V_v (%)	VAM (%)	RBV (%)	EM (kgf)	FM (0,01”)
4,50	2,462	5,96	16,99	65,06	1 398	12
5,00	2,476	4,63	16,96	72,73	1 121	14
5,50	2,488	3,39	17,02	80,10	1 095	15
6,00	2,495	2,30	17,22	86,67	981	18
6,50	2,482	2,01	18,08	88,86	852	18

Tabela 5.2. Resultados do ensaio Marshall para a mistura M2 (CAP 40/12/10).

teor de asfalto (%)	D _a	V _v (%)	VAM (%)	RBV (%)	EM (kgf)	FM (0,01")
5,0	2,465	5,41	17,34	68,92	1 066	13
5,5	2,469	4,51	17,66	74,49	943	14
6,0	2,466	3,87	18,19	78,23	816	15
6,5	2,457	3,43	18,90	81,83	692	15
7,0	2,425	3,97	20,40	80,63	495	18

Tabela 5.3. Resultados do ensaio Marshall para a mistura M3 (CAP 40/20/15).

teor de asfalto (%)	D _a	V _v (%)	VAM (%)	RBV (%)	EM (kgf)	FM (0,01")
5,0	2,412	7,50	19,11	60,76	937	14
5,5	2,430	6,08	18,94	67,90	880	14
6,0	2,446	4,71	18,83	75,01	895	16
6,5	2,458	3,49	18,87	81,51	863	16
7,0	2,445	3,25	19,73	83,52	698	17

A Tabela 5.4 apresenta os teores ótimos de cimento asfáltico para as três misturas e os valores dos parâmetros Marshall correspondentes.

Tabela 5.4. Resultados do ensaio Marshall para as três misturas dosadas.

mistura	teor ótimo (%)	densidade aparente	V _v (%)	RBV (%)	EM (kgf)	FM (0,01")
M1	5,25	2,482	4,0	78,0	1 125	14
M2	5,75	2,476	4,0	77,0	900	14
M3	6,25	2,456	4,0	79,0	900	16

Legenda:

M1: CAP 40; M2: CAP 40 + 12% borracha + 10% AR-5; M3: CAP 40 + 20% borracha + 15% AR-5

Figura 5.1. Gráficos do ensaio Marshall para a mistura M1 (CAP 40).

Figura 5.2. Gráficos do ensaio Marshall para a mistura M2 (CAP 40/12/10).

Figura 5.3. Gráficos do ensaio Marshall para a mistura M3 (CAP 40/20/15).

Este aumento do teor ótimo de cimento asfáltico das misturas contendo ligante asfalto-borracha já era esperado, conforme verificado na bibliografia consultada, embora não fosse possível prever a influência do óleo extensor sobre o comportamento destas. A mistura M2 apresenta teor ótimo 9,5% maior que o da mistura convencional e a mistura M3 tem teor ótimo 19% maior que a mistura convencional, o que acompanha, de certo modo, a tendência citada na bibliografia, de que o aumento percentual do teor ótimo de cimento asfáltico, em relação à mistura convencional, costuma ser aproximadamente igual ao percentual de borracha adicionada à mistura.

As Figuras de 5.4 a 5.8 apresentam um comparativo dos resultados obtidos para os parâmetros Marshall para as três misturas dosadas.

Figura 5.4. Comparativo da densidade aparente para as três misturas estudadas.

Quanto à densidade aparente das misturas, observa-se no gráfico uma pequena diminuição destes valores nas misturas com borracha, sendo a mistura com maior teor de borracha e óleo extensor a que apresenta menores valores de densidade. No ponto correspondente ao teor ótimo de cimento asfáltico, a densidade aparente das misturas acompanha a tendência notada anteriormente, sendo que a densidade aparente de M1 é a maior e a da mistura M3 é a menor. Embora os valores de densidade dos cimentos asfálticos (conferir Tabela 4.5, no Capítulo 5, pág. 96) aumentem na presença da borracha e do óleo extensor, esta queda nos valores de densidade aparente das misturas asfálticas se justifica, pelo menos em parte, pelo aumento dos teores ótimos de cimento asfáltico à medida que aumenta o teor de borracha e óleo extensor.

Figura 5.5. Comparativo do volume de vazios para as três misturas estudadas.

Do gráfico anterior nota-se uma tendência ao aumento do volume de vazios, para o mesmo teor de cimento asfáltico, à medida que aumentam os teores de borracha e óleo extensor. Ao estabelecer o volume de vazios igual a 4,0% para as três misturas, impõe-se um aumento no teor ótimo de cimento asfáltico das misturas M2 e M3, em relação a M1.

Figura 5.6. Comparativo da relação betume-vazios para as três misturas estudadas.

Observa-se que é necessário um aumento do teor ótimo de cimento asfáltico para que as misturas possam se enquadrar nas especificações de dosagem quanto à relação betume-vazios. A adição de borracha e óleo extensor promove um deslocamento na direção vertical das curvas de RBV, indicando que, para o mesmo teor de cimento asfáltico, ocorre aumento do volume de vazios com a adição de borracha e óleo extensor.

Figura 5.7. Comparativo da estabilidade Marshall para as três misturas estudadas.

A adição de borracha e óleo extensor promove queda da estabilidade, em relação à mistura convencional, comprovando o que é citado pela bibliografia. A Tabela 5.5 apresenta um comparativo dos valores de estabilidade Marshall das misturas estudadas, em função do teor de cimento asfáltico.

Tabela 5.5. Comparativo dos valores de estabilidade Marshall das três misturas dosadas.

teor	estabilidade (kgf)			estab M2	estab M3	estab M3
	M1	M2	M3	estab M1	estab M1	estab M2
4,5	1 398	-	-	-	-	-
5,0	1 121	1 066	937	0,95	0,84	0,88
5,5	1 095	943	880	0,86	0,80	0,93
6,0	981	816	895	0,83	0,91	1,10
6,5	852	692	863	0,81	1,01	1,25
7,0	-	495	698	-	-	1,41
ótimo	1 125	900	900	0,80	0,80	1,00

Legenda:

M1: CAP 40; M2: CAP 40 + 12% borracha + 10% AR-5; M3: CAP 40 + 20% borracha + 15% AR-5

É possível observar, na Tabela 5.5, que os valores de estabilidade Marshall das misturas modificadas com borracha e óleo extensor são razoavelmente menores que os da mistura convencional, com exceção da estabilidade da mistura M3, para o teor de 6,5%, que é, por sinal, próximo do seu teor ótimo. No teor ótimo, esta tendência também se verifica, sendo a estabilidade de ambas as misturas modificadas com borracha e óleo extensor 20% menor que a da mistura convencional. As estabilidades Marshall das duas misturas modificadas nos seus respectivos teores ótimos são iguais, indicando que não há superioridade de desempenho de uma sobre a outra.

Figura 5.8. Comparativo da fluência Marshall para as três misturas estudadas.

O gráfico anterior não apresenta uma tendência bem definida da influência da borracha e do óleo extensor sobre a fluência das misturas. No teor ótimo, as três misturas apresentam valores de fluência bem próximos, conforme indica a Tabela 5.4.

Um outro parâmetro empregado na avaliação de misturas dosadas pelo método Marshall é a capacidade de suporte Marshall (CSM), definida como a razão entre a estabilidade e a fluência Marshall. A Tabela 5.6 mostra os resultados da capacidade de suporte Marshall para as três misturas, em função do teor de cimento asfáltico empregado, e a Figura 5.9 ilustra o comportamento das misturas em função do teor de cimento asfáltico.

Tabela 5.6. Comparativo da capacidade de suporte Marshall das três misturas dosadas.

teor (%)	M1	M2	M3
4,5	446	-	-
5,0	315	331	264
5,5	287	272	247
6,0	211	219	225
6,5	186	178	212
7,0	-	106	162
ótimo	316	253	236

Legenda:

M1: CAP 40; M2: CAP 40 + 12% borracha + 10% AR-5; M3: CAP 40 + 20% borracha + 15% AR-5

Figura 5.9. Comparativo da capacidade de suporte Marshall para as três misturas estudadas.

Nota-se, na Tabela 5.6 e na Figura 5.9, que, de forma geral, a capacidade de suporte Marshall diminui com o aumento do teor de cimento asfáltico, embora não seja possível definir, graficamente, a superioridade de uma mistura sobre outra. No teor ótimo, a mistura M1 apresenta maior capacidade de suporte (25% maior que a de M2 e 34% maior que a de M3) e, dentre as misturas modificadas, a M2 apresenta maior valor (7% maior que M3).

5.3. Ensaio de resistência à tração por compressão diametral

Na Tabela 5.7 são apresentadas algumas características dos corpos-de-prova das misturas M1, M2 e M3 submetidos ao ensaio de tração indireta (3 para cada mistura), além dos dados estatísticos dos resultados de resistência à tração. Os demais dados destes ensaios estão apresentados na Tabela A1, no Anexo A. O teste de Grubbs para estes resultados não indicou a presença de “outliers” (ver Tabela B7, no Anexo B).

Tabela 5.7. Dados estatísticos dos resultados de resistência à tração e alguns parâmetros de caracterização das misturas.

mistura	n	D _a	V _v (%)	RBV (%)	área (cm ²)	carga média de ruptura (kN)	resistência à tração (MPa)		
							média	dp	cv (%)
M1	3	2,494	3,56	78,57	62,86	12,389	1,279	0,10	8,1
M2	3	2,464	4,29	76,20	63,52	5,050	0,516	0,05	10,3
M3	3	2,457	3,91	79,11	64,43	5,148	0,519	0,02	4,5

n = número de determinações;

dp = desvio padrão;

cv = coeficiente de variação;

M1: CAP 40; M2: CAP 40 + 12% borracha + 10% AR-5; M3: CAP 40 + 20% borracha + 15% AR-5

A Figura 5.10 mostra um comparativo dos valores de resistência à tração das misturas estudadas. Como pode ser observado, ocorre uma queda brusca desta propriedade nas misturas que contém borracha e óleo extensor, chegando a ser (M2) 60% menor que a resistência à tração da mistura convencional. M2 e M3 apresentam resistência à tração similar. É notável, aqui, a influência da consistência do cimento asfáltico. O CAP 40, por ser o CAP de maior consistência, dentre os comercializados no Brasil, proporciona misturas com valores altos de resistência à tração, em relação à resistência à tração de misturas executadas com os demais tipos de cimentos asfálticos.

O valor relativo do coeficiente de variação pode ser estimado pela distância que separa o topo das duas colunas – de desvio padrão e de média – sabendo-se

que, quando coincidirem, o coeficiente de variação corresponde à razão entre a escala dos dois gráficos. Nota-se, portanto, que a mistura M2 apresenta maior dispersão de resultados.

Figura 5.10. Comparativo da resistência à tração das três misturas estudadas.

A Figura 5.11 apresenta a distribuição de resultados de resistência a tração de todos os corpos-de-prova ensaiados e os resultados do coeficiente de variação.

Figura 5.11. Comparativo da resistência à tração das três misturas estudadas.

5.4. Ensaio de módulo de resiliência

Após a realização dos ensaios, foi feito o processamento dos dados, empregando planilha eletrônica. Dentre os 500 ciclos de carga e descarga, correspondentes ao intervalo de tempo de 500 s, foram selecionados 9 pontos: 299, 300, 301, 399, 400, 401, 497, 498 e 499 s, nos quais foram determinados os deslocamentos diametrais dos corpos-de-prova e o carregamento médio aplicado (média de 3 pontos). Com base nestes valores, foi calculado o módulo de resiliência para cada mistura.

A Figura 5.12 apresenta um dos 72 gráficos gerados no processamento dos dados obtidos do programa gerenciador deste ensaio e indica o procedimento apontado pelas normas ASTM D4123-82 (ASTM, 1982) e AASHTO TP 31-94 Edition 1A (AASHTO, 1994), para a determinação dos deslocamentos diametrais (verticais, no gráfico) em cada ponto e a estimativa da carga média aplicada no corpo-de-prova naqueles pontos.

Figura 5.12. Exemplo de cálculo do módulo de resiliência.

Na Tabela 5.8 são apresentadas algumas características dos corpos-de-prova das misturas M1, M2 e M3 submetidos ao ensaio de módulo de resiliência, além dos dados estatísticos dos resultados de módulo de resiliência. Os demais dados referentes aos corpos-de-prova estão mostrados na Tabela A2, no Anexo A, e as planilhas de cálculo do módulo de resiliência estão apresentadas nas Tabelas A3, A5 e A7, no mesmo anexo. O teste de Grubbs para estes resultados indicou a existência de 1 “outlier”, conforme pode ser visto na Tabela B8, no Anexo B.

Tabela 5.8. Dados estatísticos dos resultados de módulo de resiliência e alguns parâmetros de caracterização das misturas.

mistura	n	D _a	V _v (%)	RBV (%)	tensão (MPa)	módulo de resiliência (MPa)		
						média	dp	cv (%)
M1	4	2,494	3,55	78,60	0,300	5 699	1.867	32,8
M2	3	2,468	4,36	75,39	0,146	2 514	366	14,5
M3	4	2,448	4,44	76,49	0,144	1 885	569	30,2

Legenda:

M1: CAP 40; M2: CAP 40 + 12% borracha + 10% AR-5; M3: CAP 40 + 20% borracha + 15% AR-5

A Figura 5.13 mostra um comparativo da média e do desvio padrão dos valores de módulo de resiliência das três misturas estudadas. Na Figura 5.14 são apresentados os resultados de todas as determinações, acompanhados dos valores de coeficiente de variação de cada mistura. Ambas as figuras indicam uma diminuição significativa dos valores de módulo de resiliência nas misturas modificadas. Tal diferença talvez possa ser justificada, em parte, pelo fato de a mistura convencional apresentar teor ótimo relativamente baixo (5,25%, obtido para volume de vazios de 4%), o que a torna mais seca e, conseqüentemente, mais rígida. Outro fator relevante é a maior consistência do CAP 40, em relação aos demais cimentos asfálticos, que proporciona misturas mais rígidas.

O módulo de resiliência obtido para M1 é aproximadamente 2 vezes maior que o de M2 e 3 vezes maior que o de M3. E nota-se também, embora sejam desconhecidas as razões, a ocorrência de grande dispersão de resultados nas misturas M1 e M3, as quais apresentam coeficientes de variação acima de 30%. Dentre as misturas modificadas, M3 apresenta menor módulo de resiliência.

Após a realização dos ensaios de módulo de resiliência, os mesmos corpos-de-prova foram novamente ensaiados, com a mesma tensão, agora com o carregamento

aplicado na direção perpendicular à original (direção 2). O objetivo foi verificar a compatibilidade entre os resultados obtidos nas duas direções. Na Tabela 5.9 estão apresentados os dados estatísticos dos resultados obtidos. As planilhas de cálculo do módulo de resiliência assim obtido estão apresentadas nas Tabelas A4, A6 e A8, no Anexo A. O teste de Grubbs indicou a existência de 1 “outlier”, conforme Tabela B9, no Anexo B.

Figura 5.13. Média e desvio padrão dos resultados do módulo de resiliência das três misturas.

Figura 5.14. Valores de módulo de resiliência das três misturas e coeficientes de variação.

Tabela 5.9. Dados estatísticos dos resultados de módulo de resiliência, na direção 2.

misturas	n	média (MPa)	dp (MPa)	cv (%)
M1	4	7.636	2.870	37,6
M2	4	1.804	74	4,1
M3	3	1.093	140	12,8

Legenda:

M1: CAP 40; M2: CAP 40 + 12% borracha + 10% AR-5; M3: CAP 40 + 20% borracha + 15% AR-5

A Figura 5.15 mostra um comparativo da média e do desvio padrão dos valores do módulo de resiliência das misturas estudadas, na direção 2, perpendicular à original. A Figura 5.16 aponta os resultados de todas as determinações, acompanhados dos valores de coeficiente de variação de cada mistura. Como já constatado para a direção original, também ocorre uma diminuição significativa dos valores de módulo de resiliência nas misturas modificadas. E nota-se agora, embora também sejam desconhecidas as razões, a ocorrência de grande dispersão de resultados apenas na misturas M1, que apresenta coeficiente de variação acima de 37,6%.

Figura 5.15. Média e desvio padrão dos valores do módulo de resiliência das três misturas (direção 2).

Figura 5.16. Valores de módulo de resiliência das três misturas e coeficientes de variação (direção 2).

Na Tabela 5.10 estão indicados os dados estatísticos dos resultados de módulo de resiliência, agora considerando o resultado final como a média dos valores obtidos nas duas direções. A Figura 5.17 apresenta um comparativo dos valores de módulo de resiliência obtidos nas duas direções e o desvio padrão dos resultados. A Figura 5.18 indica os valores finais de módulo de resiliência, calculados como a média dos resultados obtidos nas duas direções, e o desvio padrão dos resultados. O teste de Grubbs para estes resultados indicou a existência de 1 "outlier", conforme pode ser visto na Tabela B10, no Anexo B.

Tabela 5.10. Dados estatísticos dos resultados de módulo de resiliência, representando a média dos resultados das duas direções.

misturas	n	média (MPa)	dp (MPa)	cv (%)
M1	4	6.667	1.455,517	21,8
M2	3	2.061	51,760	2,5
M3	4	1.638	470,913	28,8

Legenda:

M1: CAP 40; M2: CAP 40 + 12% borracha + 10% AR-5; M3: CAP 40 + 20% borracha + 15% AR-5

Figura 5.17. Comparativo dos valores médios do módulo de resiliência das três misturas, nas direções d_1 e d_2 , e desvio padrão.

Figura 5.18. Valores médios, das duas direções, do módulo de resiliência das três misturas e desvio padrão.

Verifica-se, com base nos resultados das três análises realizadas, que ocorre uma queda razoavelmente grande no valor do módulo de resiliência das misturas que contém borracha e óleo extensor. A presença destes produtos possivelmente torna a mistura asfáltica mais elástica, o que justifica esta queda. A mistura M3 é a que fornece o menor valor de módulo de resiliência, indicando que à medida que se aumentam os teores de borracha e óleo extensor ocorre diminuição dos valores desta propriedade.

Outros dois fatores responsáveis pela diminuição significativamente grande dos valores de módulo de resiliência das misturas modificadas, conforme já comentado anteriormente, são a maior consistência do CAP 40 e o baixo teor ótimo da mistura de referência.

Quando se obtém o módulo de resiliência como a média dos resultados das direções 1 e 2, o módulo de resiliência da mistura M3 é aproximadamente 4 vezes menor que o da mistura de referência (M1) e o da mistura M2 é aproximadamente 3 vezes menor. A comparação entre M2 e M3 indica que a influência do teor de borracha e de óleo extensor sobre o comportamento resiliente das misturas é relativamente pequena nestes dois casos estudados. M2 apresenta módulo de resiliência 32% maior que M3.

As misturas M1 e M3 são as que apresentam maiores coeficientes de variação nos resultados de módulo de resiliência, o que é visível nas três análises realizadas, e a mistura M2, nos três casos, apresenta pouca variabilidade de resultados. Porém, não se sabe o que motivou esta ocorrência.

Após a retirada dos “outliers”, foi realizado, embora se dispusesse de um número reduzido de corpos-de-prova, um teste de hipótese entre médias para o módulo de resiliência nas direções d_1 e d_2 , a fim de verificar se há diferença estatística entre os valores obtidos nestas duas direções. Os resultados dos testes indicam, com 95% de confiança, que não existe diferença estatística entre os valores médios do módulo de resiliência nas direções d_1 e d_2 para as misturas M1 e M3 e que há diferença estatística para a mistura M2. É de se supor que no primeiro ensaio ocorra algum comprometimento físico do corpo-de-prova, que acarreta alterações no seu comportamento resiliente.

5.5. Ensaio de fluência por compressão uniaxial estática

A deformação total, obtida no ensaio de fluência por compressão uniaxial estática, é definida como a deformação total obtida no final do ensaio de fluência, ou seja, após 3 600 s, no caso dos ensaios aqui realizados. A deformação recuperável é calculada como a diferença entre a deformação no final do ensaio de fluência e a deformação no final do ensaio de recuperação (após 4 500 s). A deformação não recuperável corresponde à deformação do corpo-de-prova ao final do ensaio de recuperação.

A recuperação é a relação entre a deformação recuperável e a deformação total e o módulo de fluência é definido na equação 2.16, sendo calculado como a relação entre a tensão aplicada e a deformação total correspondente do corpo-de-prova. A inclinação da curva de fluência é um parâmetro empregado por LITTLE et al. (1993), a fim de caracterizar o comportamento viscoso de uma mistura asfáltica no ensaio de fluência com carga estática. É um indicativo da tendência da mistura em acumular deformação permanente, pois representa a velocidade da fluência do material. A inclinação foi aqui calculada conforme recomendação destes pesquisadores, no intervalo de tempo entre 1 000 e 3 600 s, durante a fase de carregamento.

5.5.1. Curvas de fluência

Nas Figuras de 5.19 a 5.24 estão apresentadas as curvas de fluência e recuperação dos corpos-de-prova ensaiados, de cada uma das misturas, para as tensões de 0,4 e 0,7 MPa. Nas Figuras 5.25 e 5.26 são apresentados comparativos das médias dos resultados de fluência e de recuperação das três misturas estudadas, para os dois níveis de tensão aqui empregados.

Figura 5.19. Curvas de fluência e de recuperação dos corpos-de-prova da mistura M1 (CAP 40), para tensão de 0,4 MPa.

Figura 5.20. Curvas de fluência e de recuperação dos corpos-de-prova da mistura M2 (CAP 40/12/10), para tensão de 0,4 MPa.

Figura 5.21. Curvas de fluência e de recuperação dos corpos-de-prova da mistura M3 (CAP 40/20/15), para tensão de 0,4 MPa.

Figura 5.22. Curvas de fluência e de recuperação dos corpos-de-prova da mistura M1 (CAP 40), para tensão de 0,7 MPa.

Figura 5.23. Curvas de fluência e de recuperação dos corpos-de-prova da mistura M2 (CAP 40/12/10), para tensão de 0,7 MPa.

Figura 5.24. Curvas de fluência e de recuperação dos corpos-de-prova da mistura M3 (CAP 40/20/15), para tensão de 0,7 MPa.

Figura 5.25. Curvas de fluência e de recuperação médias das três misturas estudadas, para tensão de 0,4 MPa.

RESULTADOS MÉDIOS MISTURAS M1, M2 E M3 - 0,7 MPa

Figura 5.26. Curvas de fluência e de recuperação médias das três misturas estudadas, para tensão de 0,7 MPa.

Nas Tabelas 5.11 e 5.12 estão apresentados os valores médios de deformação total, deformação recuperável, deformação não recuperável, recuperação, módulo de fluência após o ensaio de fluência (correspondente ao tempo $t = 3\,600$ s) e após o ensaio de recuperação ($t = 4\,500$ s) e a inclinação do trecho reto da curva de fluência, obtidos dos ensaios de fluência por compressão uniaxial estática, para as tensões de 0,4 e 0,7 MPa, além do desvio padrão e coeficiente de variação destes resultados.

O teste de Grubbs para os resultados obtidos neste ensaio, para as tensões de 0,4 e 0,7 MPa indicou a ocorrência de “outliers” nos corpos-de-prova apontados na Tabela 5.13, a seguir. As tabelas com detalhamento deste teste para os resultados de fluência estática estão no Anexo B – Tabelas B11 e B12.

Os dados referentes aos corpos-de-prova utilizados nestes ensaios estão reunidos na Tabela A9, no Anexo A, no qual encontra-se também a apresentação detalhada dos resultados destes ensaios, nas Tabelas de A10 a A31.

Tabela 5.11. Dados estatísticos dos parâmetros da curva de fluência, para tensão de 0,4 MPa.

Parâmetro	mistura	n	média	desvio padrão	coeficiente de variação
deformação total (%)	M1	4	0,495	0,030	6,1
	M2	4	0,432	0,034	7,8
	M3	3	0,480	0,026	5,4
deformação recuperável (%)	M1	4	0,280	0,014	5,1
	M2	4	0,290	0,014	4,8
	M3	3	0,316	0,015	4,7
deformação não recuperável (%)	M1	4	0,215	0,037	17,1
	M2	4	0,143	0,034	23,7
	M3	3	0,164	0,033	20,4
recuperação (%)	M1	4	56,73	5,096	9,0
	M2	4	67,23	5,400	8,0
	M3	3	66,08	5,498	8,3
$M_F - 3\ 600\ s$ (MPa)	M1	4	81,09	4,750	5,9
	M2	4	92,92	7,188	7,7
	M3	3	83,49	4,402	5,3
$M_F - 4\ 500\ s$ (MPa)	M1	4	190,19	32,175	16,9
	M2	4	291,25	63,459	21,8
	M3	3	252,27	56,924	22,6
inclinação do trecho reto	M1	3	0,032	0,001	1,8
	M2	3	0,016	0,000	0,0
	M3	3	0,0016	-	-

Legenda:

M1: CAP 40; M2: CAP 40+ 12% borracha + 10% AR-5; M3: CAP 40+ 20% borracha + 15% AR-5

Tabela 5.12. Resultados médios obtidos no ensaio de fluência por compressão uniaxial estática, para tensão de 0,7 MPa.

parâmetro	mistura	n	média	desvio padrão	coeficiente de variação
deformação total (%)	M1	3	0,637	0,018	2,8
	M2	4	0,817	0,072	8,8
	M3	3	0,725	0,075	10,3
deformação recuperável (%)	M1	4	0,418	0,015	3,6
	M2	4	0,440	0,022	4,9
	M3	3	0,489	0,032	6,5
deformação não recuperável (%)	M1	3	0,216	0,025	11,4
	M2	4	0,376	0,092	24,4
	M3	3	0,237	0,057	24,2
recuperação (%)	M1	4	62,105	8,479	13,7
	M2	4	54,415	7,456	13,7
	M3	3	67,653	5,334	7,9
$M_F - 3\ 600\ s$ (MPa)	M1	3	109,867	3,122	2,8
	M2	4	86,243	7,894	9,2
	M3	3	97,173	9,710	10,0
$M_F - 4\ 500\ s$ (MPa)	M1	4	288,058	82,668	28,7
	M2	4	195,768	54,203	27,7
	M3	3	309,490	84,439	27,3
inclinação do trecho reto	M1	3	0,032	0,001	1,8
	M2	4	0,036	0,024	66,7
	M3	3	0,042	0,009	22,2

Legenda:

M1: CAP 40; M2: CAP 40+ 12% borracha + 10% AR-5; M3: CAP 40+ 20% borracha + 15% AR-5

Tabela 5.13. Ocorrência de "outliers" nos resultados dos ensaios de fluência estática.

parâmetro	mistura	determinação n°	nível de tensão (MPa)
deformação total	M1	1	0,7
deformação não recuperável	M1	1	0,7
M_F (3 600 s)	M1	1	0,7
inclinação do trecho reto	M1	3	0,4
	M2	4	
	M3	1 e 3	
	M1	4	0,7

Legenda:

M1: CAP 40; M2: CAP 40+ 12% borracha + 10% AR-5; M3: CAP 40+ 20% borracha + 15% AR-5

5.5.2. Parâmetros das curvas de fluência

As Figuras de 5.27 a 5.40 apresentam os comparativos dos resultados obtidos dos ensaios de fluência por compressão uniaxial estática efetuados nas três misturas, em termos de média, desvio padrão e coeficiente de variação, para a tensão de 0,4 MPa, incluindo: deformação total, deformação recuperável, deformação não recuperável, recuperação, módulo de fluência aos 3 600 e 4 500 s e inclinação do trecho reto da curva de fluência.

Figura 5.27. Média e desvio padrão da deformação total, no ensaio de fluência estática, das três misturas estudadas, para tensão axial de 0,4 MPa.

Figura 5.28. Valores de deformação total e coeficientes de variação, no ensaio de fluência estática, das três misturas estudadas, para tensão axial de 0,4 MPa.

Figura 5.29. Média e desvio padrão da deformação recuperável, no ensaio de fluência estática, das três misturas estudadas, para tensão axial de 0,4 MPa.

Figura 5.30. Valores da deformação recuperável e coeficientes de variação, no ensaio de fluência estática, das três misturas estudadas, para tensão axial de 0,4 MPa.

Figura 5.31. Média e desvio padrão da deformação não recuperável, no ensaio de fluência estática, das três misturas estudadas, para tensão axial de 0,4 MPa.

Figura 5.32. Valores da deformação não recuperável e coeficientes de variação, no ensaio de fluência estática, das três misturas estudadas, para tensão axial de 0,4 MPa.

Figura 5.33. Média e desvio padrão da recuperação elástica, no ensaio de fluência estática, das três misturas estudadas, para tensão axial de 0,4 MPa.

Figura 5.34. Valores da recuperação elástica e coeficientes de variação, no ensaio de fluência estática, das três misturas estudadas, para tensão axial de 0,4 MPa.

Figura 5.35. Média e desvio padrão do módulo de fluência após 3 600 s, no ensaio de fluência estática, das três misturas estudadas, para tensão axial de 0,4 MPa.

Figura 5.36. Valores do módulo de fluência após 3 600 s e coeficientes de variação, no ensaio de fluência estática, das três misturas estudadas, para tensão axial de 0,4 MPa.

Figura 5.37. Média e desvio padrão do módulo de fluência após 4 500 s, no ensaio de fluência estática, das três misturas estudadas, para tensão axial de 0,4 MPa.

Figura 5.38. Valores do módulo de fluência após 4 500 s e coeficientes de variação, no ensaio de fluência estática, das três misturas estudadas, para tensão axial de 0,4 MPa.

Figura 5.39. Média e desvio padrão da inclinação do trecho reto, no ensaio de fluência estática, das três misturas estudadas, para tensão axial de 0,4 MPa.

Figura 5.40. Valores da inclinação do trecho reto e coeficientes de variação, no ensaio de fluência estática, das três misturas estudadas, para tensão axial de 0,4 MPa.

As Figuras de 5.41 a 5.54 apresentam os comparativos dos resultados obtidos dos ensaios de fluência por compressão uniaxial estática efetuados nas três misturas, em termos de média, desvio padrão e coeficiente de variação, para a tensão de 0,7 MPa, incluindo os mesmos parâmetros apresentados anteriormente.

Figura 5.41. Média e desvio padrão da deformação total, no ensaio de fluência estática, das três misturas estudadas, para tensão axial de 0,7 MPa.

Figura 5.42. Valores de deformação total e coeficientes de variação, no ensaio de fluência estática, das três misturas estudadas, para tensão axial de 0,7 MPa.

Figura 5.43. Média e desvio padrão da deformação recuperável, no ensaio de fluência estática, das três misturas estudadas, para tensão axial de 0,7 MPa.

Figura 5.44. Valores da deformação recuperável e coeficientes de variação, no ensaio de fluência estática, das três misturas estudadas, para tensão axial de 0,7 MPa.

Figura 5.45. Média e desvio padrão da deformação não recuperável, no ensaio de fluência estática, das três misturas estudadas, para tensão axial de 0,7 MPa.

Figura 5.46. Valores da deformação não recuperável e coeficientes de variação, no ensaio de fluência estática, das três misturas estudadas, para tensão axial de 0,7 MPa.

Figura 5.47. Média e desvio padrão da recuperação elástica, no ensaio de fluência estática, das três misturas estudadas, para tensão axial de 0,7 MPa.

Figura 5.48. Valores da recuperação elástica e coeficientes de variação, no ensaio de fluência estática, das três misturas estudadas, para tensão axial de 0,7 MPa.

Figura 5.49. Média e desvio padrão do módulo de fluência após 3 600 s, no ensaio de fluência estática, das três misturas estudadas, para tensão axial de 0,7 MPa.

Figura 5.50. Valores do módulo de fluência após 3 600 s e coeficientes de variação, no ensaio de fluência estática, das três misturas estudadas, para tensão axial de 0,7 MPa.

Figura 5.51. Média e desvio padrão do módulo de fluência após 4 500 s, no ensaio de fluência estática, das três misturas estudadas, para tensão axial de 0,7 MPa.

Figura 5.52. Valores do módulo de fluência após 4 500 s e coeficientes de variação, no ensaio de fluência estática, das três misturas estudadas, para tensão axial de 0,7 MPa.

Figura 5.53. Média e desvio padrão da inclinação do trecho reto, no ensaio de fluência estática, das três misturas estudadas, para tensão axial de 0,7 MPa.

Figura 5.54. Valores da inclinação do trecho reto e coeficientes de variação, no ensaio de fluência estática, das três misturas estudadas, para tensão axial de 0,7 MPa.

Com base nos gráficos apresentados anteriormente, é possível comparar as três misturas em relação ao desempenho quanto à deformação permanente. As Tabelas 5.14 e 5.15 apresentam um resumo do desempenho das misturas em relação aos parâmetros das curvas de fluência, para as tensões de 0,4 e 0,7 MPa, respectivamente.

Na avaliação do desempenho, atribuiu-se o conceito “melhor” às misturas que apresentaram menor deformação total, maior deformação recuperável, menor deformação permanente (não recuperável), maior recuperação elástica, maiores módulos de fluência aos 3 600 e 4 500 s (correspondente aos menores valores de deformação permanente medidos nestes instantes) e menor inclinação do trecho reto da curva de fluência (indicativo da menor velocidade de fluência da mistura).

Para tensão de 0,4 MPa, quanto à deformação total, deformação recuperável e módulo de fluência aos 3 600s, o desempenho das três misturas é aparentemente semelhante e a variabilidade dos resultados é razoavelmente baixa (entre 5 e 8%). Quanto à deformação não recuperável e recuperação elástica, as misturas M2 e M3 apresentam comportamento aparentemente semelhante, sendo a variabilidade dos resultados maior para os valores de deformação não recuperável (entre 17 e 24%) que para os de recuperação elástica (entre 8 e 9%).

Tabela 5.14. Resumo do desempenho das três misturas com base nos parâmetros da curva de fluência, para tensão de 0,4 MPa.

parâmetro da curva de fluência		melhor mistura	pior mistura	dispersão dos resultados (coeficiente de variação)
deformação total		M2	M1	entre 5 e 8%
deformação recuperável		M3	M1	em torno de 5%
deformação não recuperável		M2	M1	entre 17 e 24%
recuperação elástica		M2	M1	entre 8 e 9%
M _F	3 600 s	M2	M1 e M3	entre 5 e 8%
	4 500 s	M2	M1	entre 17 e 23%
inclinação do trecho reto		M2 e M3	M1	pequena (M1) e nula (M2 e M3)

Legenda:

M1: CAP 40; M2: CAP 40 + 12% borracha + 10% AR-5; M3: CAP 40 + 20% borracha + 15% AR-5

Ainda para a tensão de 0,4 MPa, os resultados de módulo de fluência aos 4 500 s são bem distintos entre as três misturas, apresentando uma variabilidade relativamente grande dos resultados (entre 17 e 23%). Quanto à inclinação do trecho reto da curva de fluência, verifica-se uma redução dos valores para as misturas modificadas, em relação à convencional, sendo que ambas as misturas modificadas apresentam os mesmos valores de inclinação. A variabilidade dos resultados é bem baixa para a mistura de referência e nula para as misturas modificadas.

Tabela 5.15. Resumo do desempenho das três misturas com base nos parâmetros da curva de fluência, para tensão de 0,7 MPa.

parâmetro da curva de fluência		melhor mistura	pior mistura	dispersão dos resultados (coeficiente de variação)
deformação total		M1	M2	entre 3 e 10%
deformação recuperável		M3	M1	entre 3,5 e 6,5%
deformação não recuperável		M1	M2	11% (M1) e 24% (M2 e M3)
recuperação elástica		M3	M2	14% (M1 e M2) e 8% (M3)
M _F	3 600 s	M1	M2	entre 3 e 10%
	4 500 s	M3	M2	em torno de 28%
inclinação do trecho reto		M1	M3	2% (M1), 67% (M2) e 22% (M3)

Legenda:

M1: CAP 40; M2: CAP 40 + 12% borracha + 10% AR-5; M3: CAP 40 + 20% borracha + 15% AR-5

Para a tensão de 0,7 MPa, com relação à deformação total, deformação recuperável, recuperação, módulo de fluência aos 3 600 s e inclinação do trecho reto, o desempenho das três misturas é aparentemente distinto. A variabilidade dos resultados de deformação total, deformação recuperável, módulo de fluência aos 3 600 s e recuperação elástica é razoavelmente baixa (entre 3 e 14%), porém a variabilidade dos resultados de inclinação é bem grande (desde 2%, para M1, até 67%, para M2).

Quanto à deformação não recuperável e módulo de fluência aos 4 500 s, as misturas M1 e M3 apresentam comportamento aparentemente semelhante, sendo a variabilidade dos resultados maior para os valores de módulo de fluência aos 4 500 s (em torno de 28%, para as três misturas) que para os de deformação não recuperável (11% para M1 e 24% para M2 e M3).

As Figuras de 5.55 a 5.61 apresentam comparativos das médias e dos desvios padrões dos parâmetros das curvas de fluência das três misturas estudadas nesta pesquisa, para os dois níveis de tensão empregados.

Figura 5.55. Comparativos entre médias e desvios padrões da deformação total, no ensaio de fluência estática, para as tensões axiais de 0,4 e 0,7 MPa.

Figura 5.56. Comparativos entre médias e desvios padrões da deformação recuperável, no ensaio de fluência estática, para as tensões axiais de 0,4 e 0,7 MPa.

Figura 5.57. Comparativos entre médias e desvios padrões da deformação não recuperável, no ensaio de fluência estática, para as tensões axiais de 0,4 e 0,7 MPa.

Figura 5.58. Comparativos entre médias e desvios padrões da recuperação elástica, no ensaio de fluência estática, para as tensões axiais de 0,4 e 0,7 MPa.

Figura 5.59. Comparativos entre médias e desvios padrões do módulo de fluência aos 3 600 s, no ensaio de fluência estática, para as tensões axiais de 0,4 e 0,7 MPa.

Figura 5.60. Comparativos entre médias e desvios padrões do módulo de fluência aos 4 500 s, no ensaio de fluência estática, para as tensões axiais de 0,4 e 0,7 MPa.

Figura 5.61. Comparativos entre médias e desvios padrões da inclinação do trecho reto da curva de fluência, no ensaio de fluência estática, para as tensões axiais de 0,4 e 0,7 MPa.

A influência do nível de tensão é notável em boa parte dos parâmetros da curva de fluência para as três misturas estudadas. Quanto à deformação total e deformação recuperável, os valores obtidos sempre são maiores para a tensão de 0,7 MPa, com variabilidade razoavelmente baixa (entre 3 e 10%). No caso da deformação não recuperável, a mistura M1 apresentou comportamento similar para ambos os níveis e as misturas M2 e M3 apresentaram maiores valores de deformação não recuperável para 0,7 MPa, com variabilidade razoavelmente alta (de 11 a 24%).

Quanto à recuperação elástica e módulo de fluência aos 3 600 s, os valores obtidos não indicam influência do nível de tensão, com coeficiente de variação entre 3,0 e 14%. Já o módulo de fluência aos 4 500 s resultou maior para tensão de 0,7 MPa para as misturas M1 e M3 e maior para a tensão de 0,4 MPa para a mistura M2.

Os resultados de inclinação do trecho reto da curva de fluência resultaram iguais para a mistura M1, em ambos os níveis de tensão, com pequena dispersão nos resultados (1,8%). As misturas M2 e M3, na tensão de 0,4 MPa, apresentaram valores iguais de inclinação e, na tensão de 0,7 MPa, estas misturas mostraram aumento da inclinação (M3 apresenta maior inclinação), com grande variabilidade nos resultados. No caso da mistura M1, verifica-se que não há influência do nível de tensão sobre a velocidade de fluência.

As Tabelas 5.16 e 5.17 mostram uma comparação dos parâmetros obtidos nos ensaios de fluência estática das três misturas, para os dois níveis de tensão aplicados.

Tabela 5.16. Comparação dos parâmetros obtidos nos ensaios de fluência estática, com tensão de 0,4 MPa.

parâmetros	M1	M2	M3	M2/M1	M3/M1	M3/M2
def. total	0,495	0,432	0,480	0,87	0,97	1,11
def. recuperável	0,280	0,290	0,316	1,04	1,13	1,09
def. não recuperável	0,215	0,143	0,164	0,67	0,76	1,15
recuperação	56,73	67,23	66,08	1,19	1,16	0,98
M_F (MPa)	3 600 s	81,09	92,92	83,49	1,15	1,03
	4 500 s	190,19	291,25	252,27	1,53	1,33
inclinação	0,032	0,016	0,016	0,50	0,50	1,00

Legenda:

M1: CAP 40; M2: CAP 40 + 12% borracha + 10% AR-5; M3: CAP 40 + 20% borracha + 15% AR-5

Para a tensão de 0,4 MPa, quanto à deformação total, nota-se que a mistura M1 apresentou maior deformação, seguida, em ordem decrescente, pelas misturas M3 e M2, sendo a deformação total de M1 15% maior que M2 e 3% maior que M3. As misturas M1 e M3 forneceram valores de deformação similares. Dentre as misturas modificadas com borracha e óleo extensor, M2 apresentou menor deformação total (90% da deformação de M3).

No caso da deformação recuperável (ou elástica), nota-se que M1 apresenta o menor valor e M3 o maior, com M3 fornecendo deformação recuperável 13% maior que M1 e 9% maior que M2, indicando que as misturas modificadas pela adição de borracha e óleo extensor apresentam maior elasticidade que a convencional. Dentre as misturas modificadas com borracha e óleo extensor, M3 é a que apresenta maior deformação recuperável.

Com relação à deformação permanente (ou não recuperável), M1 apresentou maior valor, seguida, em ordem decrescente, por M3 e M2. Dentre as misturas modificadas com borracha e óleo extensor, verifica-se que o acúmulo de deformação permanente ocorrido na mistura M2 é 15% menor que o de M3. Também é interessante notar que a deformação não recuperável de M1 (mistura de referência) é 31% maior que a da mistura M3, que apresenta maiores teores de borracha e óleo extensor.

A recuperação média das três misturas ficou entre 56,73 e 67,23%, sendo maior para a mistura M2 (19% maior que a de M1) e menor para M1. A recuperação elástica de M3 é praticamente igual a de M2, indicando que o aumento dos teores de borracha e óleo extensor provocou, neste caso, não representou melhoria significativa das características elásticas da mistura.

Os resultados de módulo de fluência das três misturas, após 3 600 s de carregamento, apresentam valores similares, sendo que a mistura M2 forneceu o maior valor (15% maior que o de M1). São verificadas maiores diferenças nos resultados de módulo de fluência determinados após 4 500 s de carregamento. A mistura M2 forneceu o maior resultado (53% maior que M1 e 15% maior que M3) e M1 o menor.

Pela visualização do comparativo das inclinações do trecho reto da curva de fluência, pode-se concluir que a mistura M1 apresenta maior velocidade de fluência (o dobro da de M2 e da de M3) e M2 e M3 apresentam valores iguais de inclinação, embora sejam menores que os da mistura de referência.

Tabela 5.17. Comparação dos parâmetros obtidos nos ensaios de fluência estática, com tensão de 0,7 MPa.

parâmetros	M1	M2	M3	M2/M1	M3/M1	M3/M2
def. total	0,637	0,817	0,725	1,28	1,14	0,89
def. recuperável	0,418	0,44	0,489	1,05	1,17	1,11
def. não recuperável	0,216	0,376	0,237	1,74	1,10	0,63
recuperação	62,10	54,40	67,70	0,88	1,09	1,24
M _F 3 600 s	109,87	86,24	97,17	0,78	0,88	1,13
(MPa) 4 500 s	288,06	195,77	309,49	0,68	1,07	1,58
inclinação	0,032	0,036	0,042	1,13	1,31	1,17

Legenda:

M1: CAP 40; M2: CAP 40 + 12% borracha + 10% AR-5; M3: CAP 40 + 20% borracha + 15% AR-5

Para a tensão de 0,7 MPa, quanto à deformação total, nota-se que a mistura M1 apresentou menor deformação e M2 apresentou a maior, sendo 28% maior que M1 e 13% maior que M3. Dentre as misturas modificadas com borracha e óleo extensor, M3 apresentou menor deformação total (89% da deformação de M2).

No caso da deformação recuperável (ou elástica), nota-se que M1 apresenta o menor valor e M3 o maior, com M3 fornecendo deformação recuperável 17% maior que M1 e 11% maior que M2, indicando que as misturas modificadas pela adição de borracha e óleo extensor apresentam maior elasticidade que a convencional. Dentre as misturas modificadas, M3 apresenta maior deformação recuperável (11% maior que M2).

Com relação à deformação permanente (ou não recuperável), M2 apresentou maior valor, sendo 74% maior que M1 e 59% maior que M3. Dentre as misturas modificadas com borracha e óleo extensor, verifica-se que o acúmulo de deformação permanente ocorrido na mistura M2 é bem maior que o de M3. Também é interessante notar que a deformação não recuperável de M1 (mistura de referência) é 10% maior que a da mistura M3, que apresenta maiores teores de borracha e óleo extensor.

A recuperação média das três misturas ficou entre 54,40 e 67,70%, sendo maior para a mistura M3 (9% maior que M1) e menor para M2 (apenas 88% de M1). A recuperação elástica de M3 é 24% maior que a de M2, indicando que o aumento dos teores de borracha e óleo extensor provocou, neste caso, melhoria das características elásticas da mistura.

Os resultados de módulo de fluência das três misturas, após 3 600 s de carregamento, apresentam valores similares, sendo que a mistura M2 forneceu o menor valor (78% do valor obtido para M1). São verificadas maiores diferenças nos resultados de módulo de fluência determinados após 4 500 s de carregamento. A mistura M3 forneceu o maior resultado (7% maior que M1) e M2 o menor (68% de M1). O módulo de fluência da mistura M3 resultou 58% maior que o de M2.

Pela visualização do comparativo das inclinações do trecho reto da curva de fluência pode-se concluir que a mistura M3 apresenta maior velocidade de fluência (31% maior que M1), e M1 a menor. A mistura M2 apresenta inclinação 13% maior que M1. A comparação das inclinações de M2 e M3 indica que M3 apresenta inclinação 17% maior que M2.

A seguir é feita uma análise geral dos resultados dos parâmetros da curva de fluência.

Deformação total:

- a deformação total aumenta com o aumento do nível de tensão;
- para tensão de 0,4 MPa, a deformação total das misturas modificadas é menor que a da mistura convencional e para tensão de 0,7 MPa, verifica-se o inverso.

Deformação recuperável

- a deformação recuperável aumenta com o nível de tensão;
- os valores de deformação recuperável para ambas as misturas modificadas é maior que os da convencional, para ambos os níveis de tensão;
- dentre as modificadas, a mistura M3 (CAP 40/20/15) apresenta maior deformação recuperável, para ambos os níveis de tensão.

Deformação não recuperável

- a deformação não recuperável da mistura convencional é independente do nível de tensão;
- dentre as misturas modificadas, a deformação não recuperável é maior para nível de tensão maior.

Recuperação elástica

- não há tendência bem definida quanto a este parâmetro;
- ao comparar o desempenho das misturas modificadas, nota-se que ocorre aumento da recuperação elástica com o aumento dos teores de borracha e óleo extensor para tensão de 0,7 MPa, não sendo verificada melhoria significativa para tensão de 0,4 MPa.

Módulo de fluência

- não há tendência bem definida quanto a este parâmetro.

Inclinação do trecho reto da curva de fluência

- a inclinação do trecho reto da mistura convencional é independente do nível de tensão;
- no caso das misturas modificadas, a inclinação aumenta com o aumento do nível de tensão.

5.5.2. *Análise dos resultados com base nos critérios encontrados na literatura*

Com base nos resultados de deformação total e de inclinação média da curva de fluência, dos ensaios de fluência estática para tensão de 0,4 MPa, apresentados na Tabela 5.11 (pág. 142), e no critério proposto por LITTLE et al. (1993), indicado nas Tabelas 2.10 (pág. 47) e 2.11 (pág. 48), do Capítulo 2, é possível concluir que todas as misturas enquadram-se no nível de intensidade de tráfego IV daquele critério, correspondente a um tráfego de intensidade alta (número de solicitações do eixo padrão de 8,2 t acima de 10^6).

Como já observado em outras pesquisas (COELHO, 1996 e TAIRA, 2001), este critério mostra-se inadequado para a distinção de comportamento entre misturas submetidas a diferentes tratamentos como, por exemplo, os empregados aqui ou mesmo os empregados pelos pesquisadores acima citados. Todas as misturas aqui estudadas apresentaram declividade do trecho reto da curva de fluência menor que 0,17 e deformação total inferior a 0,5% (conferir Tabelas 2.10 e 5.11). Este critério utiliza limites de taxas de fluência muito maiores do que os verificados para as misturas asfálticas comumente executadas nos laboratórios de pavimentação brasileiros.

5.6. Repetibilidade dos ensaios realizados nesta pesquisa

A repetibilidade dos ensaios realizados nesta pesquisa foi avaliada segundo as prescrições da ISO 5725-2/94, cuja síntese está apresentada no Anexo C, no qual também estão apresentadas as tabelas com a análise dos resultados dos ensaios de dosagem Marshall, resistência à tração, módulo de resiliência e fluência por compressão uniaxial estática (Tabelas de C1 a C26). As Tabelas de 5.18 a 5.21 apresentam as probabilidades de ocorrência de valores menores ou iguais ao valor de repetibilidade apropriado. Os valores abaixo do nível de confiança, isto é, 95%, indicam que o ensaio é não repetível.

Tabela 5.18. Ensaio Marshall - Probabilidades de ocorrência de valores menores ou iguais ao valor de repetibilidade apropriado, de acordo com os modelos da ISO 5725-2/94, com nível de confiança de 95%.

parâmetro			D _a	V _v	RBV	EM	FM
número total de diferenças			36	37	39	39	39
diferenças maiores que "r"	modelo	r= b.m	6	7	8	5	5
		r = a + b.m	12	6	8	5	6
		r = c.m ^d	-	-	-	-	-
modelo			P(%)				
r= b.m			83,3	81,1	79,5	87,2	87,2
r = a + b.m			66,7	83,8	79,5	87,2	84,6
r = c.m ^d			-	-	-	-	-

Tabela 5.19. Ensaio de resistência à tração e de módulo de resiliência - Probabilidades de ocorrência de valores menores ou iguais ao valor de repetibilidade apropriado, de acordo com os modelos da ISO 5725-2/94, com nível de confiança de 95%.

parâmetro			resistência à tração	módulo de resiliência		
				d1	d2	d1 e d2
número total de diferenças			9	15	15	15
diferenças maiores que "r"	modelo	r = b.m	0	2	3	3
		r = a + b.m	0	6	0	9
		r = c.m ^d	-	-	-	-
modelo			P(%)			
r = b.m			100,0	77,8	66,7	80,0
r = a + b.m			100,0	33,3	100,00	40,0
r = c.m ^d			-	-	-	-

Tabela 5.20. Ensaio de fluência estática com tensão de 0,4 MPa - Probabilidades de ocorrência de valores menores ou iguais ao valor de repetibilidade apropriado, de acordo com os modelos da ISO 5725-2/94, com nível de confiança de 95%.

parâmetro	número total de diferenças	diferenças maiores que "r"			P (%)		
		modelos			modelos		
		r = b.m	r = a + b.m	r = c.m ^d	r = b.m	r = a + b.m	r = c.m ^d
def. total	15	0	0	-	100,0	100,0	-
def. recuperável	15	0	0	-	100,0	100,0	-
def. não recuperável	15	0	0	-	100,0	100,0	-
recuperação	15	0	0	-	100,0	100,0	-
M _F - 3 600 s	15	0	0	-	100,0	100,0	-
M _F - 4 500 s	15	0	0	-	100,0	100,0	-
inclinação	12	2	-	-	83,3	-	-

Tabela 5.21. Ensaio de fluência estática com tensão de 0,7 MPa - Probabilidades de ocorrência de valores menores ou iguais ao valor de repetibilidade apropriado, de acordo com os modelos da ISO 5725-2/94, com nível de confiança de 95%.

parâmetro	número total de diferenças	diferenças maiores que "r"			P (%)		
		modelos			modelos		
		r = b.m	r = a + b.m	r = c.m ^d	r = b.m	r = a + b.m	r = c.m ^d
def. total	12	1	0	-	91,7	100,0	-
def. recuperável	15	0	0	-	100,0	100,0	-
def. não recuperável	12	1	0	-	91,7	100,0	-
recuperação	15	1	0	-	93,3	100,0	-
M _F - 3 600 s	12	1	0	-	91,7	100,0	-
M _F - 4 500 s	15	0	0	-	100,0	100,0	-
inclinação	12	4	0	-	66,7	100,0	-

6. CONCLUSÕES

Esta pesquisa teve como objetivo principal o estudo, em laboratório, do comportamento mecânico de três misturas asfálticas tipo CAUQ, sendo uma de referência (empregando CAP 40) e outras duas utilizando ligante asfalto-borracha e óleo de xisto (AR-5), para futura aplicação destas em trechos experimentais. Neste capítulo, são apresentadas as conclusões obtidas da análise dos resultados indicados anteriormente. Com base nos resultados dos ensaios realizados para os corpos-de-prova das três misturas, ou seja, dosagens Marshall, resistência à tração, módulo de resiliência e fluência por compressão uniaxial estática, faz-se uma comparação das duas misturas modificadas com a mistura de referência, a fim de verificar qual delas apresenta melhor desempenho.

As três misturas avaliadas nesta pesquisa foram:

M1: CAP 40 puro (mistura de referência);

M2: CAP 40 + 12% de borracha + 10% de óleo extensor (AR-5);

M3: CAP 40 + 20% de borracha + 15% de óleo extensor.

6.1. Dosagem Marshall

Constatou-se a viabilidade técnica da adição de borracha de pneus descartados e de óleo de xisto, em concreto asfáltico, como óleo extensor de borracha, permitindo a obtenção de resultados satisfatórios quanto aos projetos de dosagem das misturas pelo método Marshall. Foram notadas apenas algumas diferenças em relação às dosagens com materiais convencionais, especialmente em relação às temperaturas de mistura e compactação dos materiais. As temperaturas mais altas são justificadas pelo aumento da viscosidade do cimento asfáltico, decorrente da adição de borracha.

As misturas modificadas com borracha e óleo extensor apresentaram teores ótimos de cimento asfáltico maiores que o teor ótimo da mistura convencional. Isto já era esperado, embora não fosse possível prever a influência do óleo de xisto sobre o comportamento das misturas. O aumento percentual nos respectivos teores ótimos acompanha, de certa forma, a tendência observada em outros projetos de dosagens empregando asfalto-borracha, nos quais fica evidenciado um aumento do teor ótimo da mistura modificada, em relação à convencional, aproximadamente igual ao teor de borracha adicionado.

Em relação aos parâmetros Marshall, observou-se que, em relação à mistura convencional, as misturas modificadas apresentam uma ligeira diminuição dos valores de densidade aparente, um aumento significativo do volume de vazios, além de fornecerem valores menores de estabilidade Marshall. No ponto correspondente ao teor ótimo, a estabilidade Marshall das misturas M2 e M3 são iguais e 20% menores que a da mistura de referência. Os valores obtidos para a relação betume-vazios indicam que é necessário um aumento do teor de cimento asfáltico para que as misturas modificadas possam se enquadrar nas especificações de projeto. Os resultados de capacidade de suporte Marshall apontam superioridade da mistura convencional e, dentre as modificadas, notam-se resultados melhores da mistura M2.

6.2. Resistência à tração

O ensaio de tração indireta foi realizado à temperatura de 25°C e ficou constatada uma queda significativa (maior que 50%) nos valores de resistência à tração para as duas misturas modificadas, com relação à convencional.

6.3. Módulo de resiliência

Foi constatada uma diminuição razoavelmente grande nos valores do módulo de resiliência, à 25°C, das misturas modificadas com borracha e óleo extensor, indicando que a adição destes produtos torna as misturas mais flexíveis. O módulo de resiliência obtido para M1 é aproximadamente 2 vezes maior que o de M2 e 3 vezes maior que o de M3.

6.3. Fluência por compressão uniaxial estática

Do ensaio de fluência por compressão uniaxial estática fica evidenciado que, para tensão de 0,4 MPa, a mistura M2 apresentou o melhor desempenho e a M1 o pior. Para a tensão de 0,7 MPa, ficou constatado que as misturas M1 e M3 apresentaram melhor desempenho e a mistura M2 o pior. Isto indica que, para tensões maiores, as misturas modificadas avaliadas neste estudo apresentam desempenho inferior. Porém, de forma geral, as misturas modificadas apresentam desempenho satisfatório quanto à resistência à deformação permanente, medida por meio do ensaio de fluência estática.

Quanto aos parâmetros da curva de fluência, pode-se concluir, em relação às misturas estudadas, que:

- a deformação total, a deformação recuperável e a inclinação do trecho reto da curva de fluência aumentaram com o aumento do nível de tensão;
- para tensão de 0,4 MPa, a deformação total das misturas modificadas é menor que a da mistura convencional e para tensão de 0,7 MPa verifica-se o inverso;
- os valores de deformação recuperável para as misturas modificadas são maiores que os da convencional, para ambos os níveis de tensão;
- dentre as modificadas, a mistura M3 (CAP 40/20/15) apresenta maior deformação recuperável, para os níveis de tensão considerados;
- os valores de deformação não recuperável e de inclinação do trecho reto para a mistura convencional são independentes do nível de tensão;
- dentre as misturas modificadas, a deformação não recuperável é maior para nível de tensão maior;
- não há tendência bem definida do desempenho das misturas quanto à recuperação elástica e módulo de fluência aos 3 600 e 4 500 s;
- ao comparar o desempenho das misturas modificadas, nota-se que ocorre aumento da recuperação elástica com o aumento dos teores de borracha e óleo extensor para tensão de 0,7 MPa, não sendo verificada melhoria significativa para tensão de 0,4 MPa;
- não foi verificada influência do aumento dos teores de borracha e óleo extensor sobre a velocidade de fluência, na tensão de 0,4 MPa; para tensão de 0,7 MPa, ocorre aumento da velocidade de fluência em função do aumento do percentual destes modificadores, em relação à mistura convencional.

A análise dos resultados obtidos nestes ensaios, para o nível de tensão de 0,4 MPa, à luz do critério apresentado por LITTLE et al. (1993), não possibilitou a identificação de superioridade de uma mistura sobre a outra. Todas as misturas, analisadas segundo este critério, enquadram-se no nível de intensidade de tráfego IV, indicando que podem ser submetidas a um tráfego de intensidade alta (número de solicitações do eixo padrão de 8,2 t acima de 10^6).

Como já observado em outras pesquisas e também conforme o que ficou constatado aqui, o critério proposto por LITTLE et al. (1993) mostra-se inadequado para a distinção de comportamento entre misturas submetidas a diferentes tratamentos, como por exemplo, os empregados nesta e em outras pesquisas. Este critério utiliza limites de taxas de fluência muito maiores que os verificados para as misturas asfálticas comumente executadas nos laboratórios de pavimentação no Brasil, mostrando-se, portanto, um critério altamente conservador.

6.4. Identificação de “outliers”

O método de Grubbs para identificação de “outliers”, apresentado sucintamente no item 4.8 (pág. 112), Capítulo 4, é uma ferramenta estatística simples e, portanto, bastante prática para este tipo de análise. Porém, trata-se de um teste que utiliza uma estatística que é contaminada pelo próprio “outlier”, pois faz uso da média e do desvio padrão das determinações.

Para pesquisas mais aprofundadas e de maior vulto, recomenda-se a utilização de ferramentas mais precisas e eficientes para a identificação de “outliers”, inclusive o emprego de mais de um tipo de identificador de “outliers”, a fim de se comparar os resultados das análises.

6.5. Repetibilidade dos ensaios desta pesquisa

O estudo da repetibilidade dos métodos de ensaio empregados nesta pesquisa, realizado com nível de confiança de 95%, indica que:

- todos os parâmetros Marshall são não repetíveis;
- o ensaio de resistência à tração é repetível;
- o ensaio de módulo de resiliência é não repetível;
- a maioria dos parâmetros do ensaio de fluência são repetíveis, para nível de tensão de 0,4 MPa, à exceção da inclinação do trecho reto da curva de fluência. Para tensão de 0,7 MPa, todos os parâmetros são repetíveis para o modelo II sugerido pela norma ISO 5725-2/94. Já para o modelo I, a maioria dos parâmetros é não repetível, à exceção da deformação recuperável e do módulo de fluência medido a 4 500s.

A maioria dos ensaios realizados nesta pesquisa - por sinal, os mais usuais no desenvolvimento de pesquisas no Brasil - apresentam grande variabilidade nos resultados que fornecem. Esta variabilidade se deve a vários fatores, discutidos pela ISO 5725 (ver Apêndice A), porém, é conveniente refletir se o nível de confiança adotado (95%) não é alto demais, em se tratando de ensaios que sabidamente apresentam grande dispersão nos resultados.

6.6. Conclusões finais

Os resultados das dosagens Marshall indicaram ser viável a execução, em laboratório, de misturas asfálticas empregando ligante asfalto-borracha e óleo de xisto como óleo extensor de borracha. Mesmo para a mistura M3 (CAP 40 + 20% borracha + 15% óleo de xisto), cujos teores de borracha e óleo são altos, os resultados mostraram-se satisfatórios, quando comparados com a mistura convencional e com a mistura M2 (CAP 40 + 12% borracha + 10% AR-5).

Com base nos resultados dos ensaios aqui realizados, acredita-se ser viável a execução de trechos experimentais empregando as duas misturas modificadas (M2: CAP 40 + 12% borracha + 10% AR-5 e M3: CAP 40 + 20% borracha + 15% AR-5), pois apresentam resultados satisfatórios para a maioria dos parâmetros de ensaios analisados (estabilidade Marshall, capacidade de suporte Marshall, módulo de resiliência e resistência à deformação permanente).

A crescente preocupação das autoridades governamentais, indústrias e cidadãos comuns com a disposição de resíduos sólidos, em especial dos pneus descartados, é um motivador de pesquisas, tanto de laboratório, quanto de campo, do reaproveitamento da borracha obtida destes pneus em serviços de pavimentação asfáltica. Os custos iniciais maiores que os observados com cimentos asfálticos convencionais podem impor obstáculos à disseminação do uso do asfalto-borracha no país. Por outro lado, há que se considerar os benefícios ambientais gerados pela reciclagem de pneus, que, embora de difícil quantificação, podem justificar economicamente a escolha das alternativas asfalto-borracha.

É importante salientar que o sucesso completo ou mesmo parcial das experiências com asfalto-borracha em ensaios de laboratório não garante o sucesso das experiências de campo. A utilização de materiais não convencionais impõe ao construtor a necessidade de cuidados especiais em todas as etapas do processo construtivo. No caso específico da produção de misturas asfálticas contendo asfalto-borracha, é imperativo que se dê atenção especial às características da borracha moída, ao cumprimento dos requisitos relativos à seleção dos agregados, à escolha do cimento asfáltico, aos processos de produção do ligante asfalto-borracha, ao projeto de mistura asfáltica e, ainda, com relação às recomendações referentes às etapas de usinagem e aplicação das misturas.

Ao construtor, além da responsabilidade em introduzir maior qualidade na produção das misturas asfálticas, impõe-se um desafio ainda maior: trabalhar com temperaturas e energias de compactação maiores e obter um bom desempenho com massa mais porosa. A borracha presente na mistura torna-a mais viscosa e exige maiores temperaturas de espalhamento e compactação. Essas temperaturas localizam-se perto dos limites plausíveis para que não ocorra deterioração do asfalto devido ao excesso de calor. Por consequência e em associação a outras modificações reológicas da mistura, há uma tendência de se obter, tanto no campo como no laboratório, misturas com maiores teores de vazios em relação àquelas convencionais ou sem borracha.

A intensificação dos estudos sobre a aplicação de pneus descartados em pavimentação asfáltica é essencial para a perfeita avaliação da viabilidade de implantação desta tecnologia no meio rodoviário brasileiro. Somente com base em resultados consistentes de estudos de laboratório e da execução cuidadosa e acompanhamento continuado de trechos experimentais, realizados com o asfalto-borracha, será possível a escolha racional desta alternativa, isto é, tendo em vista as vantagens ambientais, tecnológicas e

econômicas, considerando-se as características dos materiais de pavimentação disponíveis em nosso país.

6.7. Sugestões para pesquisas posteriores

A fim de complementar o conhecimento da influência da borracha de pneus e do óleo de xisto sobre o desempenho de misturas asfálticas, são sugeridos os seguintes temas para pesquisas futuras:

- determinar o teor ótimo de óleo de xisto, para um mesmo teor de borracha, empregando ensaios com o ligante, de dosagem Marshall e outros ensaios de caracterização mecânica de misturas asfálticas;
- estudar a estabilidade à estocagem do ligante asfalto-borracha, para diversos níveis de borracha e óleo de xisto;
- estudar a influência do óleo de xisto sobre o envelhecimento de misturas asfálticas empregando ligante tipo asfalto-borracha, a curto e longo prazo;
- estudar a influência do óleo de xisto sobre o envelhecimento do ligante tipo asfalto-borracha, a curto e longo prazo;
- realizar outros ensaios com CAUQ empregando ligante asfalto-borracha e óleo de xisto, como o de fadiga e o de deformação permanente em simulador de tráfego;
- estudar a aplicação de ligante tipo asfalto-borracha empregando óleo de xisto em reciclagem de camadas asfálticas;
- comparar o comportamento de misturas empregando ligante tipo asfalto-borracha e óleo de xisto com misturas asfálticas modificadas com polímeros;
- estudar o comportamento mecânico de misturas a frio empregando emulsões asfálticas com ligante tipo asfalto-borracha e óleo de xisto;
- realização do ensaio Lottman (AASHTO T 283-89/1993 – “Standard method of test for resistance of compacted bituminous mixture to moisture-induced damage”), para avaliação da suscetibilidade à ação da água de misturas asfálticas modificadas com borracha e óleo extensor.

ANEXOS

- Anexo A Resultados dos ensaios de resistência à tração por compressão diametral simples, módulo de resiliência por compressão diametral com carga repetida e fluência por compressão uniaxial estática.
- Anexo B Resultados do teste de Grubbs para identificação de “outliers”.
- Anexo C Resultados de repetibilidade dos ensaios de dosagem Marshall, resistência à tração por compressão diametral simples, módulo de resiliência por compressão diametral com carga repetida e fluência por compressão uniaxial estática.

Nota. Foi utilizado o seguinte critério para a enumeração dos corpos-de-prova das três misturas, empregados nos ensaios cujos resultados são mostrados neste anexo:

- os corpos-de-prova da mistura M1 são designados apenas por um número; p. ex.: 1, 2...
- os corpos-de-prova da mistura M2 são designados por um número seguido da letra “A”; por ex.: 1A, 2A...
- os corpos-de-prova da mistura M3 são designados apenas por um número seguido da letra “B”; p. ex.: 1B, 2B...

ANEXO A

Resultados dos ensaios de resistência à tração por compressão diametral simples, módulo de resiliência por compressão diametral com carga repetida e fluência por compressão uniaxial estática.

Tabela A1. Resultados dos ensaios de resistência à tração por compressão diametral simples.

CP nº	altura (cm)		diâmetro (cm)		pesos (g)		carga de ruptura (kN)	carga média de ruptura (kN)
	h ₁	h ₃	d ₁	d ₃	ao ar	imerso		
	h ₂	h _M	d ₂	d _M	D _a	V _v (%)	tensão de ruptura (MPa)	tensão média de ruptura (MPa)
	área (cm²)				RBV (%)			
1	6,20	6,15	10,18	10,13	1236,13	742,20	11,425	12,389
	6,13	6,16	10,18	10,16	2,503	3,21	1,185	
	62,61				80,29			
2	6,17	6,23	10,15	10,10	1240,74	742,40	12,258	1,279
	6,22	6,21	10,19	10,15	2,490	3,71	1,264	
	62,98				77,82			
3	6,22	6,20	10,16	10,15	1235,69	739,20	13,484	5,050
	6,19	6,20	10,15	10,15	2,489	3,75	1,390	
	62,98				77,65			
1A	6,21	6,31	10,16	10,12	1251,96	746,60	4,511	0,516
	6,32	6,28	10,15	10,14	2,477	3,79	0,460	
	63,70				78,43			
2A	6,25	6,29	10,16	10,09	1243,49	739,40	5,099	0,516
	6,24	6,26	10,10	10,12	2,467	4,20	0,523	
	63,33				76,57			
3A	6,27	6,27	10,12	10,14	1240,00	733,70	5,541	5,148
	6,26	6,27	10,16	10,14	2,449	4,89	0,566	
	63,54				73,61			
1B	6,28	6,30	10,17	10,11	1251,22	745,50	5,148	0,519
	6,28	6,29	10,13	10,14	2,474	3,24	0,524	
	63,73				82,11			
2B	6,39	6,35	10,15	10,14	1250,59	740,00	4,903	0,519
	6,36	6,37	10,15	10,15	2,449	4,21	0,493	
	64,60				77,76			
3B	6,39	6,43	10,17	10,11	1259,18	744,70	5,394	0,519
	6,40	6,41	10,14	10,14	2,447	4,29	0,539	
	64,96				77,46			

Tabela A2. Características dos corpos-de-prova usados no ensaio de módulo de resiliência por compressão diametral dinâmica.

CP n°	altura (cm)		diâmetro (cm)		pesos (g)	
	h ₁	h ₃	d ₁	d ₃	ao ar	imerso
	h ₂	h _M	d ₂	d _M	Da (g/cm ³)	Vv (%)
	área (cm ²)				RBV (%)	
4	6,15	6,17	10,18	10,17	1233,75	738,60
	6,25	6,19	10,18	10,18	2,492	3,64
	62,99				78,18	
5	6,18	6,22	10,18	10,17	1237,65	741,30
	6,20	6,20	10,16	10,17	2,494	3,57
	63,05				78,53	
6	6,19	6,22	10,18	10,16	1243,11	743,40
	6,22	6,21	10,10	10,15	2,488	3,79
	63,01				77,43	
7	6,12	6,20	10,15	10,14	1236,50	742,40
	6,20	6,17	10,13	10,14	2,503	3,22
	62,60				80,27	
4A	6,25	6,26	10,16	10,05	1244,36	739,60
	6,27	6,26	10,10	10,10	2,465	4,26
	63,25				76,30	
5A	6,20	6,28	10,10	10,15	1249,38	748,20
	6,26	6,25	10,16	10,14	2,493	3,19
	63,32				81,31	
6A	6,27	6,26	10,06	10,08	1239,21	735,30
	6,27	6,27	10,10	10,08	2,459	4,89
	63,17				72,44	
7A	6,32	6,30	10,15	10,08	1248,41	739,60
	6,34	6,32	10,06	10,10	2,454	5,11
	63,81				71,52	
4B	6,32	6,33	10,13	10,13	1254,19	743,60
	6,33	6,33	10,12	10,13	2,456	3,94
	64,07				78,96	
5B	6,35	6,32	10,15	10,15	1246,40	737,50
	6,32	6,33	10,17	10,16	2,449	4,22
	64,29				77,74	
6B	6,36	6,36	10,09	10,10	1248,99	738,00
	6,33	6,35	10,15	10,11	2,444	4,41
	64,22				76,92	
7B	6,34	6,35	10,20	10,17	1249,24	737,50
	6,34	6,34	10,17	10,18	2,441	5,20
	64,58				72,33	

Tabela A3. Resultados dos ensaios de módulo de resiliência por compressão diametral dinâmica – mistura M1, direção d₁.

nome do arquivo:		cp4t2cap40d131201d1a			
mistura		M1			
coeficiente de Poisson		0,30			
altura média (cm)		6,19			
tempo (s)	carga (kgf)	deslocamento (cm)	Mr (MPa)	Mr MÉDIO (MPa)	Mr FINAL (MPa)
299	187,00	0,00032	5.366,81	5.698	5.778
300		0,00027	6.360,66		
301		0,00032	5.366,81		
399	192,00	0,00027	6.530,73	5.883	
400		0,00029	6.080,34		
401		0,00035	5.037,99		
497	190,00	0,00031	5.628,81	5.754	
498		0,00030	5.816,44		
499		0,00030	5.816,44		

nome do arquivo:		cp5t2cap40d131201d1a			
mistura		M1			
coeficiente de Poisson		0,30			
altura média (cm)		6,20			
tempo (s)	carga (kgf)	deslocamento (cm)	Mr (MPa)	Mr MÉDIO (MPa)	Mr FINAL (MPa)
299	184,00	0,00017	9.924,13	8.798	8.072
300		0,00021	8.033,82		
301		0,00020	8.435,51		
399	180,00	0,00022	7.501,94	7.202	
400		0,00025	6.601,70		
401		0,00022	7.501,94		
497	184,00	0,00023	7.335,23	8.217	
498		0,00020	8.435,51		
499		0,00019	8.879,48		

nome do arquivo:		cp6t2cap40d131201d1a			
mistura		M1			
coeficiente de Poisson		0,30			
altura média (cm)		6,21			
tempo (s)	carga (kgf)	deslocamento (cm)	Mr (MPa)	Mr MÉDIO (MPa)	Mr FINAL (MPa)
299	190,00	0,00043	4.044,91	3.815	3.522
300		0,00047	3.700,66		
301		0,00047	3.700,66		
399	190,00	0,00053	3.281,72	3.337	
400		0,00048	3.623,56		
401		0,00056	3.105,91		
497	190,00	0,00053	3.281,72	3.413	
498		0,00050	3.478,62		
499		0,00050	3.478,62		

nome do arquivo:		cp7t2cap40d131201d1a			
mistura		M1			
coeficiente de Poisson		0,30			
altura média (cm)		6,17			
tempo (s)	carga (kgf)	deslocamento (cm)	Mr (MPa)	Mr MÉDIO (MPa)	Mr FINAL (MPa)
299	187,00	0,00042	4.102,25	5.200	5.422
300		0,00029	5.941,19		
301		0,00031	5.557,89		
399	192,00	0,00032	5.528,17	5.647	
400		0,00031	5.706,50		
401		0,00031	5.706,50		
497	192,00	0,00032	5.528,17	5.420	
498		0,00034	5.202,98		
499		0,00032	5.528,17		

MÓDULO DE RESILIÊNCIA DA MISTURA M1 d1 (MPa):

5.699

Tabela A4. Resultados dos ensaios de módulo de resiliência por compressão diametral dinâmica – mistura M1, direção d₂.

nome do arquivo:		cp4t2cap40d131201d2a			
mistura		M1			
coeficiente de Poisson		0,30			
altura média (cm)		6,19			
tempo (s)	carga (kgf)	deslocamento (cm)	Mr (MPa)	Mr MÉDIO (MPa)	Mr FINAL (MPa)
299	187,00	0,00020	8.586,89	8.014	7.375
300		0,00025	6.869,52		
301		0,00020	8.586,89		
399	187,00	0,00021	8.178,00	7.426	
400		0,00029	5.922,00		
401		0,00021	8.178,00		
497	192,00	0,00032	5.510,31	6.685	
498		0,00022	8.014,99		
499		0,00027	6.530,73		

nome do arquivo:		cp5t2cap40d131201d2a			
mistura		M1			
coeficiente de Poisson		0,30			
altura média (cm)		6,20			
tempo (s)	carga (kgf)	deslocamento (cm)	Mr (MPa)	Mr MÉDIO (MPa)	Mr FINAL (MPa)
299	190,00	0,00035	4.977,47	5.078	5.005
300		0,00033	5.279,14		
301		0,00035	4.977,47		
399	190,00	0,00031	5.619,73	5.202	
400		0,00033	5.279,14		
401		0,00037	4.708,42		
497	190,00	0,00034	5.123,87	4.736	
498		0,00034	5.123,87		
499		0,00044	3.959,35		

nome do arquivo:		cp6t2cap40d131201d2a			
mistura		M1			
coeficiente de Poisson		0,30			
altura média (cm)		6,21			
tempo (s)	carga (kgf)	deslocamento (cm)	Mr (MPa)	Mr MÉDIO (MPa)	Mr FINAL (MPa)
299	190,00	0,00026	6.689,66	7.061	6.481
300		0,00028	6.211,82		
301		0,00021	8.282,43		
399	190,00	0,00025	6.957,24	6.322	
400		0,00030	5.797,70		
401		0,00028	6.211,82		
497	190,00	0,00025	6.957,24	6.060	
498		0,00031	5.610,68		
499		0,00031	5.610,68		

nome do arquivo:		cp7t2cap40d131201d2a			
mistura		M1			
coeficiente de Poisson		0,30			
altura média (cm)		6,17			
tempo (s)	carga (kgf)	deslocamento (cm)	Mr (MPa)	Mr MÉDIO (MPa)	Mr FINAL (MPa)
299	188,00	0,00016	10.826,00	12.269	11.684
300		0,00012	14.434,66		
301		0,00015	11.547,73		
399	190,00	0,00015	11.670,58	11.158	
400		0,00013	13.466,05		
401		0,00021	8.336,13		
497	187,00	0,00017	10.134,98	11.625	
498		0,00015	11.486,31		
499		0,00013	13.253,43		

MÓDULO DE RESILIÊNCIA DA MISTURA M1 d₂ (MPa):

7.636

Tabela A5. Resultados dos ensaios de módulo de resiliência por compressão diametral dinâmica – mistura M2, direção d₁.

nome do arquivo:		cp4at112d141201d1a			
mistura		M2			
coeficiente de Poisson		0,30			
altura média (cm)		6,26			
tempo (s)	carga (kgf)	deslocamento (cm)	Mr (MPa)	MrMEDIO (MPa)	MrFINAL (MPa)
299	90,00	0,00034	2.403,83	2.167	2.258
300		0,00038	2.150,80		
301		0,00042	1.945,96		
399	90,00	0,00035	2.335,15	2.316	
400		0,00037	2.208,93		
401		0,00034	2.403,83		
497	93,00	0,00037	2.282,56	2.293	
498		0,00034	2.483,96		
499		0,00040	2.111,37		

nome do arquivo:		cp5at112d141201d1a			
mistura		M2			
coeficiente de Poisson		0,30			
altura média (cm)		6,25			
tempo (s)	carga (kgf)	deslocamento (cm)	Mr (MPa)	Mr MEDIO (MPa)	Mr FINAL (MPa)
299	91,00	0,00035	2.364,88	2.191	2.318
300		0,00037	2.237,05		
301		0,00042	1.970,73		
399	90,00	0,00033	2.480,64	2.387	
400		0,00036	2.273,92		
401		0,00034	2.407,68		
497	92,00	0,00034	2.461,18	2.375	
498		0,00034	2.461,18		
499		0,00038	2.202,11		

nome do arquivo:		cp6at112d141201d1a			
mistura		M2			
coeficiente de Poisson		0,30			
altura média (cm)		6,27			
tempo (s)	carga (kgf)	deslocamento (cm)	Mr (MPa)	Mr MEDIO (MPa)	Mr FINAL (MPa)
299	91,00	0,00027	3.055,80	2.636	2.428
300		0,00034	2.426,67		
301		0,00034	2.426,67		
399	94,00	0,00044	1.936,97	2.293	
400		0,00035	2.435,05		
401		0,00034	2.506,67		
497	94,00	0,00038	2.242,81	2.356	
498		0,00033	2.582,63		
499		0,00038	2.242,81		

nome do arquivo:		cp7at112d141201d1a			
mistura		M2			
coeficiente de Poisson		0,30			
altura média (cm)		6,32			
tempo (s)	carga (kgf)	deslocamento (cm)	Mr (MPa)	Mr MÉDIO (MPa)	Mr FINAL (MPa)
299	94,00	0,00026	3.252,02	3.107	3.052
300		0,00026	3.252,02		
301		0,00030	2.818,41		
399	95,00	0,00030	2.848,40	2.916	
400		0,00030	2.848,40		
401		0,00028	3.051,85		
497	95,00	0,00029	2.946,62	3.133	
498		0,00026	3.286,61		
499		0,00027	3.164,89		

MÓDULO DE RESILIÊNCIA DA MISTURA M2 d1 (MPa):

2.514

Tabela A6. Resultados dos ensaios de módulo de resiliência por compressão diametral dinâmica – mistura M2, direção d_2 .

nome do arquivo:		cp-lat112d141201d2a			
mistura		M2			
coeficiente de Poisson		0,30			
altura média (cm)		6,26			
tempo (s)	carga (kgf)	deslocamento (cm)	Mr (MPa)	Mr MEDIO (MPa)	Mr FINAL (MPa)
299	90,00	0,00043	1.900,71	1.874	1.861
300		0,00046	1.776,75		
301		0,00042	1.945,96		
399	92,00	0,00047	1.777,59	1.742	
400		0,00050	1.670,93		
401		0,00047	1.777,59		
497	93,00	0,00042	2.010,83	1.966	
498		0,00045	1.876,77		
499		0,00042	2.010,83		

nome do arquivo:		cp5at112d141201d2a			
mistura		M2			
coeficiente de Poisson		0,30			
altura média (cm)		6,25			
tempo (s)	carga (kgf)	deslocamento (cm)	Mr (MPa)	Mr MEDIO (MPa)	Mr FINAL (MPa)
299	90,00	0,00046	1.779,59	1.780	1.701
300		0,00046	1.779,59		
301		0,00046	1.779,59		
399	95,00	0,00050	1.728,18	1.499	
400		0,00046	1.878,46		
401		0,00097	890,81		
497	92,00	0,00042	1.992,39	1.824	
498		0,00044	1.901,82		
499		0,00053	1.578,87		

nome do arquivo:		cp6at112d141201d2a			
mistura		M2			
coeficiente de Poisson		0,30			
altura média (cm)		6,27			
tempo (s)	carga (kgf)	deslocamento (cm)	Mr (MPa)	Mr MEDIO (MPa)	Mr FINAL (MPa)
299	95,00	0,00039	2.208,55	2.125	1.798
300		0,00039	2.208,55		
301		0,00044	1.957,58		
399	92,00	0,00100	834,13	1.464	
400		0,00037	2.254,41		
401		0,00064	1.303,33		
497	92,00	0,00050	1.668,27	1.806	
498		0,00044	1.895,76		
499		0,00045	1.853,63		

nome do arquivo:		cp7at112d141201d2a			
mistura		M2			
coeficiente de Poisson		0,30			
altura média (cm)		6,32			
tempo (s)	deslocamento (cm)	D (cm)	Mr (MPa)	Mr MEDIO (MPa)	Mr FINAL (MPa)
299	95,00	0,00053	1.612,30	1.863	1.854 ("outlier")
300		0,00042	2.034,57		
301		0,00044	1.942,09		
399	97,00	0,00045	1.938,91	1.922	
400		0,00053	1.646,24		
401		0,00040	2.181,27		
497	96,00	0,00050	1.727,03	1.776	
498		0,00049	1.762,27		
499		0,00047	1.837,26		

MÓDULO DE RESILIÊNCIA DA MISTURA M2 d_2 (MPa):

1.787

Tabela A7. Resultados dos ensaios de módulo de resiliência por compressão diametral dinâmica – mistura M3, direção d₁.

nome do arquivo:		cp4bt120d171201d1a			
mistura		M3			
coeficiente de Poisson		0,30			
altura média (cm)		6,33			
tempo (s)	carga (kgf)	deslocamento (cm)	Mr (MPa)	Mr MÉDIO (MPa)	Mr FINAL (MPa)
299	90,00	0,00050	1.616,53	1.593	1.540
300		0,00047	1.719,71		
301		0,00056	1.443,33		
399	93,00	0,00058	1.440,01	1.410	
400		0,00057	1.465,28		
401		0,00063	1.325,73		
497	92,00	0,00047	1.757,93	1.616	
498		0,00052	1.588,90		
499		0,00055	1.502,23		

nome do arquivo:		cp5bt120d171201d1a			
mistura		M3			
coeficiente de Poisson		0,30			
altura média (cm)		6,33			
tempo (s)	carga (kgf)	deslocamento (cm)	MR (MPa)	MR MÉDIO (MPa)	MR FINAL (MPa)
299	94,00	0,00028	3.014,96	2.539	2.645
300		0,00032	2.638,09		
301		0,00043	1.963,23		
399	92,00	0,00037	2.233,05	2.472	
400		0,00034	2.430,08		
401		0,00030	2.754,09		
497	95,00	0,00029	2.941,96	2.923	
498		0,00032	2.666,15		
499		0,00027	3.159,89		

nome do arquivo:		cp6bt120d171201d1a			
mistura		M3			
coeficiente de Poisson		0,30			
altura média (cm)		6,35			
tempo (s)	carga (kgf)	deslocamento (cm)	Mr (MPa)	Mr MÉDIO (MPa)	Mr FINAL (MPa)
299	90,00	0,00045	1.790,49	1.715	1.986
300		0,00058	1.389,17		
301		0,00041	1.965,17		
399	93,00	0,00046	1.809,95	1.943	
400		0,00043	1.936,23		
401		0,00040	2.081,44		
497	93,00	0,00040	2.081,44	2.302	
498		0,00028	2.973,49		
499		0,00045	1.850,17		

nome do arquivo:		cp7bt120d171201d1a				
mistura						
coeficiente de Poisson						
altura média (cm)						
tempo (s)		carga (kgf)	deslocamento (cm)	MR (MPa)	MR MÉDIO (MPa)	MR FINAL (MPa)
299	93,00		0,00060	1.389,82	1.475	1.371
300			0,00061	1.367,03		
301			0,00050	1.667,78		
399	93,00		0,00063	1.323,64	1.346	
400			0,00068	1.226,31		
401			0,00056	1.489,09		
497	93,00		0,00062	1.344,98	1.291	
498			0,00065	1.282,91		
499			0,00067	1.244,61		

MÓDULO DE RESILIÊNCIA DA MISTURA M3 d₁ (MPa):

1.885

Tabela A8. Resultados dos ensaios de módulo de resiliência por compressão diametral dinâmica – mistura M3, direção d₂.

nome do arquivo:		cp4bt120d171201d2a			
mistura		M3			
coeficiente de Poisson		0,30			
altura média (cm)		6,33			
tempo (s)	carga (kgf)	deslocamento (cm)	Mr (MPa)	MrMEDIO (MPa)	MrFINAL (MPa)
299	92,00	0,00075	1.101,64	1.058	973
300		0,00085	972,03		
301		0,00075	1.101,64		
399	89,00	0,00112	713,65	941	
400		0,00072	1.110,12		
401		0,00080	999,11		
497	92,00	0,00076	1.087,14	921	
498		0,00090	918,03		
499		0,00109	758,01		

nome do arquivo:		cp5bt120d171201d2a			
mistura		M3			
coeficiente de Poisson		0,30			
altura média (cm)		6,33			
tempo (s)	carga (kgf)	deslocamento (cm)	Mr (MPa)	Mr MEDIO (MPa)	Mr FINAL (MPa)
299	93,00	0,00072	1.160,01	1.258	1.247
300		0,00066	1.265,47		
301		0,00062	1.347,11		
399	91,00	0,00067	1.219,77	1.328	
400		0,00055	1.485,90		
401		0,00064	1.276,95		
497	93,00	0,00073	1.144,12	1.156	
498		0,00075	1.113,61		
499		0,00069	1.210,45		

nome do arquivo:		cp6bt120d181201d2a			
mistura		M3			
coeficiente de Poisson		0,30			
altura média (cm)		6,35			
tempo (s)	carga (kgf)	deslocamento (cm)	Mr (MPa)	Mr MEDIO (MPa)	Mr FINAL (MPa)
299	90,00	0,00037	2.177,62	3.066	2.281
300		0,00024	3.357,17		
301		0,00022	3.662,36		
399	91,00	0,00041	1.987,01	1.988	
400		0,00042	1.939,70		
401		0,00040	2.036,68		
497	94,00	0,00051	1.650,06	1.789	
498		0,00038	2.214,55		
499		0,00056	1.502,73		

nome do arquivo:		cp7bt120d181201d2a			
mistura		M3			
coeficiente de Poisson		0,30			
altura média (cm)		6,34			
tempo (s)	carga (kgf)	deslocamento (cm)	MR (MPa)	MR MÉDIO (MPa)	MR FINAL (MPa)
299	93,00	0,00067	1.244,61	1.143	1.058
300		0,00080	1.042,36		
301		0,00073	1.142,32		
399	93,00	0,00132	631,74	911	
400		0,00087	958,49		
401		0,00073	1.142,32		
497	94,00	0,00068	1.239,50	1.120	
498		0,00092	916,15		
499		0,00070	1.204,08		

MÓDULO DE RESILIÊNCIA DA MISTURA M3 d₂ (MPa):

1.390

Tabela A9. Características dos corpos-de-prova usados no ensaio de fluência por compressão uniaxial estática.

CP nº	altura (cm)		diâmetro (cm)		pesos (g)	
	h ₁	h ₃	d ₁	d ₃	ao ar	imerso
	h ₂	h _M	d ₂	d _M	Da (g/cm ³)	Vv (%)
	área (cm ²)				RBV (%)	
4	6,15	6,15	10,18	10,16	1233,75	738,60
	6,16	6,15	10,18	10,17	2,492	3,64
	81,29				78,18	
5	6,18	6,17	10,18	10,17	1237,65	741,30
	6,20	6,18	10,16	10,17	2,494	3,57
	81,23				78,53	
6	6,17	6,18	10,18	10,17	1243,11	743,40
	6,15	6,17	10,17	10,17	2,488	3,79
	81,29				77,43	
12	6,16	6,18	10,18	10,17	1232,83	737,70
	6,13	6,16	10,17	10,17	2,490	3,70
	81,29				77,85	
4A	6,24	6,22	10,14	10,15	1244,36	739,60
	6,26	6,24	10,14	10,14	2,465	4,26
	80,81				76,30	
5A	6,27	6,23	10,15	10,18	1249,38	748,20
	6,19	6,23	10,11	10,15	2,493	3,19
	80,86				81,31	
6A	6,26	6,27	10,18	10,07	1239,21	735,30
	6,25	6,26	10,13	10,13	2,459	4,89
	80,54				72,44	
11A	6,26	6,24	10,20	10,18	1245,93	741,70
	6,26	6,25	10,15	10,18	2,471	4,04
	81,34				77,29	
6B	6,32	6,35	10,18	10,14	1248,99	738,00
	6,32	6,33	10,16	10,16	2,444	4,41
	81,07				76,92	
7B	6,32	6,33	10,18	10,16	1249,24	737,50
	6,34	6,33	10,13	10,16	2,441	5,20
	81,02				72,33	
8B	6,38	6,36	10,16	10,16	1248,40	738,15
	6,38	6,37	10,17	10,16	2,447	4,32
	81,13				77,32	

Tabela A9. Características dos corpos-de-prova usados no ensaio de fluência por compressão uniaxial estática. (Cont.)

CP n°	altura (cm)		diâmetro (cm)		pesos (g)	
	h ₁	h ₃	d ₁	d ₃	ao ar	imerso
	h ₂	h _M	d ₂	d _M	Da (g/cm ³)	Vv (%)
	área (cm ²)				RBV (%)	
7	6,11	6,11	10,18	10,12	1236,92	744,00
	6,18	6,13	10,15	10,15	2,509	2,95
	80,91				81,63	
8	6,16	6,17	10,23	10,18	1239,76	743,80
	6,15	6,16	10,18	10,20	2,500	3,33
	81,66				79,72	
9	6,16	6,12	10,18	10,13	1236,95	742,80
	6,16	6,15	10,20	10,17	2,503	3,19
	81,23				80,40	
10	6,22	6,21	10,18	10,21	1239,51	739,50
	6,25	6,23	10,15	10,18	2,479	4,13
	81,39				75,85	
7A	6,31	6,33	10,17	10,15	1249,53	742,50
	6,30	6,31	10,17	10,16	2,464	4,29
	81,13				76,16	
8A	6,33	6,34	10,18	10,18	1248,48	738,70
	6,33	6,33	10,18	10,18	2,449	4,89
	81,39				73,60	
9A	6,30	6,32	10,17	10,16	1243,11	737,20
	6,30	6,31	10,16	10,16	2,457	4,97
	81,13				72,11	
10A	6,26	6,25	10,16	10,16	1242,90	740,80
	6,25	6,25	10,17	10,16	2,475	3,87
	81,13				78,08	
9B	6,33	6,30	10,19	10,17	1252,75	743,20
	6,32	6,32	10,17	10,18	2,459	3,85
	81,34				79,33	
10B	6,30	6,32	10,17	10,16	1249,72	741,60
	6,29	6,30	10,16	10,16	2,459	4,49
	81,13				75,32	
11B	6,32	6,35	10,17	10,15	1253,99	743,50
	6,36	6,34	10,15	10,16	2,456	3,93
	81,02				78,97	

Tabela A10. Resultados do ensaio de fluência estática do corpo-de-prova CP7 - mistura M1.

ENSAIO DE FLUÊNCIA POR COMPRESSÃO UNIAXIAL ESTÁTICA

mistura	CAP 40 puro
tensão (MPa)	0,4
data	05.02.02
Ho (mm)	61,3

FASE DE CARREGAMENTO				
tempo		D _h	deformação	M _F
s	min	(mm)	(%)	(MPa)
0	0:00	0,00	0,000	-
0,1	0:00	0,18	0,294	136,22
30	0:30	0,22	0,359	111,45
60	1:00	0,23	0,375	106,61
90	1:30	0,24	0,392	102,17
120	2:00	0,25	0,408	98,08
150	2:30	0,25	0,408	98,08
180	3:00	0,25	0,408	98,08
210	3:30	0,25	0,408	98,08
240	4:00	0,26	0,424	94,31
270	4:30	0,26	0,424	94,31
300	5:00	0,26	0,424	94,31
360	6:00	0,26	0,424	94,31
420	7:00	0,27	0,440	90,81
480	8:00	0,27	0,440	90,81
540	9:00	0,27	0,440	90,81
600	10:00	0,27	0,440	90,81
660	11:00	0,28	0,457	87,57
720	12:00	0,28	0,457	87,57
780	13:00	0,28	0,457	87,57
840	14:00	0,28	0,457	87,57
900	15:00	0,28	0,457	87,57
960	16:00	0,28	0,457	87,57
1.020	17:00	0,28	0,457	87,57
1.080	18:00	0,28	0,457	87,57
1.140	19:00	0,28	0,457	87,57
1.200	20:00	0,29	0,473	84,55
1.260	21:00	0,29	0,473	84,55
1.320	22:00	0,29	0,473	84,55
1.380	23:00	0,29	0,473	84,55
1.440	24:00	0,29	0,473	84,55
1.500	25:00	0,29	0,473	84,55
1.560	26:00	0,29	0,473	84,55
1.620	27:00	0,29	0,473	84,55
1.680	28:00	0,29	0,473	84,55
1.740	29:00	0,29	0,473	84,55
1.800	30:00	0,29	0,473	84,55
2.100	35:00	0,29	0,473	84,55
2.400	40:00	0,30	0,489	81,73
2.700	45:00	0,30	0,489	81,73
3.000	50:00	0,30	0,489	81,73
3.300	55:00	0,30	0,489	81,73
3.600	60:00	0,30	0,489	81,73

FASE DE DESCARREGAMENTO				
tempo		D _h	deformação	M _F
s	min	(mm)	(%)	(MPa)
3.630	0:30	0,19	0,310	129,05
3.660	1:00	0,16	0,261	153,25
3.690	1:30	0,16	0,261	153,25
3.720	2:00	0,16	0,261	153,25
3.750	2:30	0,15	0,245	163,47
3.780	3:00	0,15	0,245	163,47
3.810	3:30	0,15	0,245	163,47
3.840	4:00	0,15	0,245	163,47
3.870	4:30	0,15	0,245	163,47
3.900	5:00	0,15	0,245	163,47
3.960	6:00	0,15	0,245	163,47
4.020	7:00	0,15	0,245	163,47
4.080	8:00	0,15	0,245	163,47
4.140	9:00	0,14	0,228	175,14
4.200	10:00	0,14	0,228	175,14
4.260	11:00	0,14	0,228	175,14
4.320	12:00	0,14	0,228	175,14
4.380	13:00	0,14	0,228	175,14
4.440	14:00	0,14	0,228	175,14
4.500	15:00	0,14	0,228	175,14

Observações:

1. Corpo-de-prova utilizado no ensaio de módulo de resiliência.

deformação total (%)	0,489
deformação recuperável (%)	0,261
deformação não recuperável (%)	0,228
recuperação (%)	53,33
M _F (MPa) - após 3 600 s	81,73
M _F (MPa) - após 4 500 s	175,14
declividade "b" da curva de fluência	
1 000 - 3 600 s	0,033

Tabela A11. Resultados do ensaio de fluência estática do corpo-de-prova CP8 - mistura M1.

ENSAIO DE FLUÊNCIA POR COMPRESSÃO UNIAXIAL ESTÁTICA

mistura	CAP 40 puro
tensão (MPa)	0,4
data	07.02.02
Ho (mm)	61,6

FASE DE CARREGAMENTO				
tempo		D _h (mm)	deformação (%)	M _F (MPa)
s	min			
0	0:00	0,00	0,000	-
0,1	0:00	0,17	0,276	144,94
30	0:30	0,22	0,357	112,00
60	1:00	0,23	0,373	107,13
90	1:30	0,24	0,390	102,67
120	2:00	0,24	0,390	102,67
150	2:30	0,24	0,390	102,67
180	3:00	0,25	0,406	98,56
210	3:30	0,25	0,406	98,56
240	4:00	0,25	0,406	98,56
270	4:30	0,25	0,406	98,56
300	5:00	0,26	0,422	94,77
360	6:00	0,26	0,422	94,77
420	7:00	0,26	0,422	94,77
480	8:00	0,26	0,422	94,77
540	9:00	0,27	0,438	91,26
600	10:00	0,27	0,438	91,26
660	11:00	0,27	0,438	91,26
720	12:00	0,27	0,438	91,26
780	13:00	0,27	0,438	91,26
840	14:00	0,27	0,438	91,26
900	15:00	0,27	0,438	91,26
960	16:00	0,28	0,455	88,00
1.020	17:00	0,28	0,455	88,00
1.080	18:00	0,28	0,455	88,00
1.140	19:00	0,28	0,455	88,00
1.200	20:00	0,28	0,455	88,00
1.260	21:00	0,28	0,455	88,00
1.320	22:00	0,28	0,455	88,00
1.380	23:00	0,28	0,455	88,00
1.440	24:00	0,28	0,455	88,00
1.500	25:00	0,28	0,455	88,00
1.560	26:00	0,28	0,455	88,00
1.620	27:00	0,28	0,455	88,00
1.680	28:00	0,28	0,455	88,00
1.740	29:00	0,28	0,455	88,00
1.800	30:00	0,29	0,471	84,97
2.100	35:00	0,29	0,471	84,97
2.400	40:00	0,29	0,471	84,97
2.700	45:00	0,29	0,471	84,97
3.000	50:00	0,29	0,471	84,97
3.300	55:00	0,30	0,487	82,13
3.600	60:00	0,30	0,487	82,13

FASE DE DESCARREGAMENTO				
tempo		D _h (mm)	deformação (%)	M _F (MPa)
s	min			
3.630	0:30	0,19	0,308	129,68
3.660	1:00	0,15	0,244	164,27
3.690	1:30	0,14	0,227	176,00
3.720	2:00	0,14	0,227	176,00
3.750	2:30	0,13	0,211	189,54
3.780	3:00	0,13	0,211	189,54
3.810	3:30	0,13	0,211	189,54
3.840	4:00	0,13	0,211	189,54
3.870	4:30	0,13	0,211	189,54
3.900	5:00	0,13	0,211	189,54
3.960	6:00	0,13	0,211	189,54
4.020	7:00	0,13	0,211	189,54
4.080	8:00	0,12	0,195	205,33
4.140	9:00	0,12	0,195	205,33
4.200	10:00	0,12	0,195	205,33
4.260	11:00	0,12	0,195	205,33
4.320	12:00	0,12	0,195	205,33
4.380	13:00	0,12	0,195	205,33
4.440	14:00	0,12	0,195	205,33
4.500	15:00	0,12	0,195	205,33

Observações:

deformação total (%)	0,487
deformação recuperável (%)	0,292
deformação não recuperável (%)	0,195
recuperação (%)	60,00
M _F (MPa) - após 3 600 s	82,13
M _F (MPa) - após 4 500 s	205,33
declividade "b" da curva de fluência	
1 000 - 3 600 s	0,032

Tabela A12. Resultados do ensaio de fluência estática do corpo-de-prova CP9 - mistura M1.

ENSAIO DE FLUÊNCIA POR COMPRESSÃO UNIAXIAL ESTÁTICA

mistura	CAP 40 puro
tensão (MPa)	0,4
data	08.02.02
Ho (mm)	61,5

FASE DE CARREGAMENTO				
tempo		D _h	deformação	M _F
s	min	(mm)	(%)	(MPa)
0	0:00	0,00	0,000	-
0,1	0:00	0,16	0,260	153,75
30	0:30	0,22	0,358	111,82
60	1:00	0,24	0,390	102,50
90	1:30	0,25	0,407	98,40
120	2:00	0,25	0,407	98,40
150	2:30	0,26	0,423	94,62
180	3:00	0,26	0,423	94,62
210	3:30	0,27	0,439	91,11
240	4:00	0,27	0,439	91,11
270	4:30	0,27	0,439	91,11
300	5:00	0,28	0,455	87,86
360	6:00	0,28	0,455	87,86
420	7:00	0,28	0,455	87,86
480	8:00	0,29	0,472	84,83
540	9:00	0,29	0,472	84,83
600	10:00	0,29	0,472	84,83
660	11:00	0,29	0,472	84,83
720	12:00	0,30	0,488	82,00
780	13:00	0,30	0,488	82,00
840	14:00	0,30	0,488	82,00
900	15:00	0,30	0,488	82,00
960	16:00	0,30	0,488	82,00
1.020	17:00	0,30	0,488	82,00
1.080	18:00	0,31	0,504	79,35
1.140	19:00	0,31	0,504	79,35
1.200	20:00	0,31	0,504	79,35
1.260	21:00	0,31	0,504	79,35
1.320	22:00	0,31	0,504	79,35
1.380	23:00	0,31	0,504	79,35
1.440	24:00	0,31	0,504	79,35
1.500	25:00	0,31	0,504	79,35
1.560	26:00	0,31	0,504	79,35
1.620	27:00	0,32	0,520	76,87
1.680	28:00	0,32	0,520	76,87
1.740	29:00	0,32	0,520	76,87
1.800	30:00	0,32	0,520	76,87
2.100	35:00	0,32	0,520	76,87
2.400	40:00	0,32	0,520	76,87
2.700	45:00	0,33	0,537	74,55
3.000	50:00	0,33	0,537	74,55
3.300	55:00	0,33	0,537	74,55
3.600	60:00	0,33	0,537	74,55

FASE DE DESCARREGAMENTO				
tempo		D _h	deformação	M _F
s	min	(mm)	(%)	(MPa)
3.630	0:30	0,19	0,309	129,47
3.660	1:00	0,18	0,293	136,67
3.690	1:30	0,18	0,293	136,67
3.720	2:00	0,17	0,276	144,71
3.750	2:30	0,17	0,276	144,71
3.780	3:00	0,17	0,276	144,71
3.810	3:30	0,17	0,276	144,71
3.840	4:00	0,17	0,276	144,71
3.870	4:30	0,17	0,276	144,71
3.900	5:00	0,16	0,260	153,75
3.960	6:00	0,16	0,260	153,75
4.020	7:00	0,16	0,260	153,75
4.080	8:00	0,16	0,260	153,75
4.140	9:00	0,16	0,260	153,75
4.200	10:00	0,16	0,260	153,75
4.260	11:00	0,16	0,260	153,75
4.320	12:00	0,16	0,260	153,75
4.380	13:00	0,16	0,260	153,75
4.440	14:00	0,16	0,260	153,75
4.500	15:00	0,16	0,260	153,75

Observações:

deformação total (%)	0,537
deformação recuperável (%)	0,276
deformação não recuperável (%)	0,260
recuperação (%)	51,52
M _F (MPa) - após 3 600 s	74,55
M _F (MPa) - após 4 500 s	153,75
declividade "b" da curva de fluência	
1 000 - 3 600 s	0,049

Tabela A13. Resultados do ensaio de fluência estática do corpo-de-prova CP10 - mistura M1.

ENSAIO DE FLUÊNCIA POR COMPRESSÃO UNIAXIAL ESTATICA

mistura	CAP 40 puro
tensão (MPa)	0,4
data	08.02.02
H ₀ (mm)	62,3

FASE DE CARREGAMENTO				
tempo		D _h (mm)	deformação (%)	M _F (MPa)
s	min			
0	0:00	0,00	0,000	-
0,1	0:00	0,18	0,289	138,44
30	0:30	0,22	0,353	113,27
60	1:00	0,23	0,369	108,35
90	1:30	0,24	0,385	103,83
120	2:00	0,24	0,385	103,83
150	2:30	0,24	0,385	103,83
180	3:00	0,25	0,401	99,68
210	3:30	0,25	0,401	99,68
240	4:00	0,25	0,401	99,68
270	4:30	0,25	0,401	99,68
300	5:00	0,26	0,417	95,85
360	6:00	0,26	0,417	95,85
420	7:00	0,26	0,417	95,85
480	8:00	0,26	0,417	95,85
540	9:00	0,26	0,417	95,85
600	10:00	0,27	0,433	92,30
660	11:00	0,27	0,433	92,30
720	12:00	0,27	0,433	92,30
780	13:00	0,27	0,433	92,30
840	14:00	0,27	0,433	92,30
900	15:00	0,27	0,433	92,30
960	16:00	0,27	0,433	92,30
1.020	17:00	0,27	0,433	92,30
1.080	18:00	0,27	0,433	92,30
1.140	19:00	0,27	0,433	92,30
1.200	20:00	0,28	0,449	89,00
1.260	21:00	0,28	0,449	89,00
1.320	22:00	0,28	0,449	89,00
1.380	23:00	0,28	0,449	89,00
1.440	24:00	0,28	0,449	89,00
1.500	25:00	0,28	0,449	89,00
1.560	26:00	0,28	0,449	89,00
1.620	27:00	0,28	0,449	89,00
1.680	28:00	0,28	0,449	89,00
1.740	29:00	0,28	0,449	89,00
1.800	30:00	0,28	0,449	89,00
2.100	35:00	0,28	0,449	89,00
2.400	40:00	0,28	0,449	89,00
2.700	45:00	0,28	0,449	89,00
3.000	50:00	0,29	0,465	85,93
3.300	55:00	0,29	0,465	85,93
3.600	60:00	0,29	0,465	85,93

FASE DE DESCARREGAMENTO				
tempo		D _h (mm)	deformação (%)	M _F (MPa)
s	min			
3.630	0:30	0,14	0,225	178,00
3.660	1:00	0,13	0,209	191,69
3.690	1:30	0,13	0,209	191,69
3.720	2:00	0,13	0,209	191,69
3.750	2:30	0,12	0,193	207,67
3.780	3:00	0,12	0,193	207,67
3.810	3:30	0,12	0,193	207,67
3.840	4:00	0,12	0,193	207,67
3.870	4:30	0,12	0,193	207,67
3.900	5:00	0,12	0,193	207,67
3.960	6:00	0,12	0,193	207,67
4.020	7:00	0,12	0,193	207,67
4.080	8:00	0,12	0,193	207,67
4.140	9:00	0,12	0,193	207,67
4.200	10:00	0,12	0,193	207,67
4.260	11:00	0,11	0,177	226,55
4.320	12:00	0,11	0,177	226,55
4.380	13:00	0,11	0,177	226,55
4.440	14:00	0,11	0,177	226,55
4.500	15:00	0,11	0,177	226,55

Observações:

deformação total (%)	0,465
deformação recuperável (%)	0,289
deformação não recuperável (%)	0,177
recuperação (%)	62,07
M _F (MPa) - após 3 600 s	
85,93	
M _F (MPa) - após 4 500 s	
226,55	
declividade "b" da curva de fluência	
1 000 - 3 600 s	0,032

Tabela A14. Resultados do ensaio de fluência estática do corpo-de-prova CP7a - mistura M2.

ENSAIO DE FLUÊNCIA POR COMPRESSÃO UNIAXIAL ESTÁTICA

mistura	CAP 40/12/10
tensão (MPa)	0,4
data	05.02.02
H _{méd} (mm)	63,1

FASE DE CARREGAMENTO				
tempo		D _h	deformação	M _F
s	min	(mm)	(%)	(MPa)
0	0:00	0,00	0,000	-
0,1	0:00	0,24	0,380	105,17
30	0:30	0,26	0,412	97,08
60	1:00	0,26	0,412	97,08
90	1:30	0,27	0,428	93,48
120	2:00	0,28	0,444	90,14
150	2:30	0,28	0,444	90,14
180	3:00	0,28	0,444	90,14
210	3:30	0,28	0,444	90,14
240	4:00	0,28	0,444	90,14
270	4:30	0,28	0,444	90,14
300	5:00	0,28	0,444	90,14
360	6:00	0,28	0,444	90,14
420	7:00	0,29	0,460	87,03
480	8:00	0,29	0,460	87,03
540	9:00	0,29	0,460	87,03
600	10:00	0,29	0,460	87,03
660	11:00	0,29	0,460	87,03
720	12:00	0,29	0,460	87,03
780	13:00	0,29	0,460	87,03
840	14:00	0,29	0,460	87,03
900	15:00	0,29	0,460	87,03
960	16:00	0,29	0,460	87,03
1.020	17:00	0,29	0,460	87,03
1.080	18:00	0,30	0,475	84,13
1.140	19:00	0,30	0,475	84,13
1.200	20:00	0,30	0,475	84,13
1.260	21:00	0,30	0,475	84,13
1.320	22:00	0,30	0,475	84,13
1.380	23:00	0,30	0,475	84,13
1.440	24:00	0,30	0,475	84,13
1.500	25:00	0,30	0,475	84,13
1.560	26:00	0,30	0,475	84,13
1.620	27:00	0,30	0,475	84,13
1.680	28:00	0,30	0,475	84,13
1.740	29:00	0,30	0,475	84,13
1.800	30:00	0,30	0,475	84,13
2.100	35:00	0,30	0,475	84,13
2.400	40:00	0,30	0,475	84,13
2.700	45:00	0,30	0,475	84,13
3.000	50:00	0,30	0,475	84,13
3.300	55:00	0,30	0,475	84,13
3.600	60:00	0,30	0,475	84,13

FASE DE DESCARREGAMENTO				
tempo		D _h	deformação	M _F
s	min	(mm)	(%)	(MPa)
3.630	0:30	0,14	0,222	180,29
3.660	1:00	0,14	0,222	180,29
3.690	1:30	0,13	0,206	194,15
3.720	2:00	0,13	0,206	194,15
3.750	2:30	0,13	0,206	194,15
3.780	3:00	0,13	0,206	194,15
3.810	3:30	0,13	0,206	194,15
3.840	4:00	0,13	0,206	194,15
3.870	4:30	0,12	0,190	210,33
3.900	5:00	0,12	0,190	210,33
3.960	6:00	0,12	0,190	210,33
4.020	7:00	0,12	0,190	210,33
4.080	8:00	0,12	0,190	210,33
4.140	9:00	0,12	0,190	210,33
4.200	10:00	0,12	0,190	210,33
4.260	11:00	0,12	0,190	210,33
4.320	12:00	0,12	0,190	210,33
4.380	13:00	0,12	0,190	210,33
4.440	14:00	0,12	0,190	210,33
4.500	15:00	0,12	0,190	210,33

Observações:

1. Corpo-de-prova utilizado no ensaio de módulo de resiliência.

deformação total (%)	0,475
deformação recuperável (%)	0,285
deformação não recuperável (%)	0,190
recuperação (%)	60,00
M _F (MPa) - após 3 600 s	84,13
M _F (MPa) - após 4 500 s	210,33
declividade "b" da curva de fluência	
1 000 - 3 600 s	0,016

Tabela A15. Resultados do ensaio de fluência estática do corpo-de-prova CP8a - mistura M2

ENSAIO DE FLUÊNCIA POR COMPRESSÃO UNIAXIAL ESTÁTICA

mistura	CAP 40/12/10
tensão (MPa)	0,4
data	05.02.02
H _{MÉDIA} (mm)	63,3

FASE DE CARREGAMENTO				
tempo		D _h (mm)	deformação (%)	M _F (MPa)
s	min			
0	0:00	0,00	0,000	-
0,1	0:00	0,21	0,332	120,57
30	0:30	0,23	0,363	110,09
60	1:00	0,23	0,363	110,09
90	1:30	0,24	0,379	105,50
120	2:00	0,24	0,379	105,50
150	2:30	0,24	0,379	105,50
180	3:00	0,24	0,379	105,50
210	3:30	0,24	0,379	105,50
240	4:00	0,24	0,379	105,50
270	4:30	0,24	0,379	105,50
300	5:00	0,24	0,379	105,50
360	6:00	0,25	0,395	101,28
420	7:00	0,25	0,395	101,28
480	8:00	0,25	0,395	101,28
540	9:00	0,25	0,395	101,28
600	10:00	0,25	0,395	101,28
660	11:00	0,25	0,395	101,28
720	12:00	0,25	0,395	101,28
780	13:00	0,25	0,395	101,28
840	14:00	0,25	0,395	101,28
900	15:00	0,25	0,395	101,28
960	16:00	0,25	0,395	101,28
1.020	17:00	0,25	0,395	101,28
1.080	18:00	0,25	0,395	101,28
1.140	19:00	0,25	0,395	101,28
1.200	20:00	0,25	0,395	101,28
1.260	21:00	0,25	0,395	101,28
1.320	22:00	0,25	0,395	101,28
1.380	23:00	0,25	0,395	101,28
1.440	24:00	0,25	0,395	101,28
1.500	25:00	0,25	0,395	101,28
1.560	26:00	0,25	0,395	101,28
1.620	27:00	0,25	0,395	101,28
1.680	28:00	0,25	0,395	101,28
1.740	29:00	0,25	0,395	101,28
1.800	30:00	0,25	0,395	101,28
2.100	35:00	0,26	0,411	97,38
2.400	40:00	0,26	0,411	97,38
2.700	45:00	0,26	0,411	97,38
3.000	50:00	0,26	0,411	97,38
3.300	55:00	0,26	0,411	97,38
3.600	60:00	0,26	0,411	97,38

FASE DE DESCARREGAMENTO				
tempo		D _h (mm)	deformação (%)	M _F (MPa)
s	min			
3.630	0:30	0,1	0,158	253,20
3.660	1:00	0,1	0,158	253,20
3.690	1:30	0,1	0,142	281,33
3.720	2:00	0,1	0,142	281,33
3.750	2:30	0,1	0,142	281,33
3.780	3:00	0,1	0,126	316,50
3.810	3:30	0,1	0,126	316,50
3.840	4:00	0,1	0,126	316,50
3.870	4:30	0,1	0,126	316,50
3.900	5:00	0,1	0,126	316,50
3.960	6:00	0,1	0,126	316,50
4.020	7:00	0,1	0,126	316,50
4.080	8:00	0,1	0,126	316,50
4.140	9:00	0,1	0,126	316,50
4.200	10:00	0,1	0,126	316,50
4.260	11:00	0,1	0,126	316,50
4.320	12:00	0,1	0,126	316,50
4.380	13:00	0,1	0,126	316,50
4.440	14:00	0,1	0,111	361,71
4.500	15:00	0,1	0,111	361,71

Observações:

deformação total (%)	0,411
deformação recuperável (%)	0,300
deformação não recuperável (%)	0,111
recuperação (%)	73,08
M _F (MPa) - após 3 600 s	97,38
M _F (MPa) - após 4 500 s	361,71
declividade "b" da curva de fluência	
1 000 - 3 600 s	0,016

Tabela A16. Resultados do ensaio de fluência estática do corpo-de-prova CP9a - mistura M2.

ENSAIO DE FLUÊNCIA POR COMPRESSÃO UNIAXIAL ESTÁTICA

mistura	CAP 40/12/10
tensão (MPa)	0,4
data	05.02.02
HmÉDIA (mm)	63,1

FASE DE CARREGAMENTO				
tempo		D _h	deformação	M _F
s	min	(mm)	(%)	(MPa)
0	0:00	0,00	0,000	-
0,1	0:00	0,21	0,333	120,19
30	0:30	0,24	0,380	105,17
60	1:00	0,24	0,380	105,17
90	1:30	0,25	0,396	100,96
120	2:00	0,25	0,396	100,96
150	2:30	0,25	0,396	100,96
180	3:00	0,25	0,396	100,96
210	3:30	0,25	0,396	100,96
240	4:00	0,25	0,396	100,96
270	4:30	0,26	0,412	97,08
300	5:00	0,26	0,412	97,08
360	6:00	0,26	0,412	97,08
420	7:00	0,26	0,412	97,08
480	8:00	0,26	0,412	97,08
540	9:00	0,26	0,412	97,08
600	10:00	0,27	0,428	93,48
660	11:00	0,27	0,428	93,48
720	12:00	0,27	0,428	93,48
780	13:00	0,27	0,428	93,48
840	14:00	0,27	0,428	93,48
900	15:00	0,27	0,428	93,48
960	16:00	0,27	0,428	93,48
1.020	17:00	0,27	0,428	93,48
1.080	18:00	0,27	0,428	93,48
1.140	19:00	0,27	0,428	93,48
1.200	20:00	0,27	0,428	93,48
1.260	21:00	0,27	0,428	93,48
1.320	22:00	0,27	0,428	93,48
1.380	23:00	0,27	0,428	93,48
1.440	24:00	0,28	0,444	90,14
1.500	25:00	0,28	0,444	90,14
1.560	26:00	0,28	0,444	90,14
1.620	27:00	0,28	0,444	90,14
1.680	28:00	0,28	0,444	90,14
1.740	29:00	0,28	0,444	90,14
1.800	30:00	0,28	0,444	90,14
2.100	35:00	0,28	0,444	90,14
2.400	40:00	0,28	0,444	90,14
2.700	45:00	0,28	0,444	90,14
3.000	50:00	0,28	0,444	90,14
3.300	55:00	0,28	0,444	90,14
3.600	60:00	0,28	0,444	90,14

FASE DE DESCARREGAMENTO				
tempo		D _h	deformação	M _F
s	min	(mm)	(%)	(MPa)
3.630	0:30	0,12	0,190	210,33
3.660	1:00	0,12	0,190	210,33
3.690	1:30	0,11	0,174	229,45
3.720	2:00	0,11	0,174	229,45
3.750	2:30	0,11	0,174	229,45
3.780	3:00	0,11	0,174	229,45
3.810	3:30	0,11	0,174	229,45
3.840	4:00	0,1	0,158	252,40
3.870	4:30	0,1	0,158	252,40
3.900	5:00	0,1	0,158	252,40
3.960	6:00	0,1	0,158	252,40
4.020	7:00	0,1	0,158	252,40
4.080	8:00	0,1	0,158	252,40
4.140	9:00	0,1	0,158	252,40
4.200	10:00	0,1	0,158	252,40
4.260	11:00	0,1	0,158	252,40
4.320	12:00	0,1	0,158	252,40
4.380	13:00	0,09	0,143	280,44
4.440	14:00	0,09	0,143	280,44
4.500	15:00	0,09	0,143	280,44

Observações:

deformação total (%)	0,444
deformação recuperável (%)	0,301
deformação não recuperável (%)	0,143
recuperação (%)	67,86
M _F (MPa) - após 3 600 s	90,14
M _F (MPa) - após 4 500 s	280,44
declividade "b" da curva de fluência	
1 000 - 3 600 s	0,016

Tabela A17. Resultados do ensaio de fluência estática do corpo-de-prova CP10a - mistura M2.

ENSAIO DE FLUÊNCIA POR COMPRESSÃO UNIAXIAL ESTÁTICA

mistura	CAP 40/12/10
tensão (MPa)	0,4
data	06.02.02
H ₀ (mm)	62,5

FASE DE CARREGAMENTO				
tempo		D _h (mm)	deformação (%)	M _F (MPa)
s	min			
0	0:00	0,00	0,000	-
0,1	0:00	0,20	0,320	125,00
30	0:30	0,23	0,368	108,70
60	1:00	0,23	0,368	108,70
90	1:30	0,24	0,384	104,17
120	2:00	0,24	0,384	104,17
150	2:30	0,24	0,384	104,17
180	3:00	0,24	0,384	104,17
210	3:30	0,24	0,384	104,17
240	4:00	0,24	0,384	104,17
270	4:30	0,24	0,384	104,17
300	5:00	0,24	0,384	104,17
360	6:00	0,24	0,384	104,17
420	7:00	0,25	0,400	100,00
480	8:00	0,25	0,400	100,00
540	9:00	0,25	0,400	100,00
600	10:00	0,25	0,400	100,00
660	11:00	0,25	0,400	100,00
720	12:00	0,25	0,400	100,00
780	13:00	0,25	0,400	100,00
840	14:00	0,25	0,400	100,00
900	15:00	0,25	0,400	100,00
960	16:00	0,25	0,400	100,00
1.020	17:00	0,25	0,400	100,00
1.080	18:00	0,25	0,400	100,00
1.140	19:00	0,25	0,400	100,00
1.200	20:00	0,25	0,400	100,00
1.260	21:00	0,25	0,400	100,00
1.320	22:00	0,25	0,400	100,00
1.380	23:00	0,25	0,400	100,00
1.440	24:00	0,25	0,400	100,00
1.500	25:00	0,25	0,400	100,00
1.560	26:00	0,25	0,400	100,00
1.620	27:00	0,25	0,400	100,00
1.680	28:00	0,25	0,400	100,00
1.740	29:00	0,25	0,400	100,00
1.800	30:00	0,25	0,400	100,00
2.100	35:00	0,25	0,400	100,00
2.400	40:00	0,25	0,400	100,00
2.700	45:00	0,25	0,400	100,00
3.000	50:00	0,25	0,400	100,00
3.300	55:00	0,25	0,400	100,00
3.600	60:00	0,25	0,400	100,00

FASE DE DESCARREGAMENTO				
tempo		D _h (mm)	deformação (%)	M _F (MPa)
s	min			
3.630	0:30	0,1	0,160	250,00
3.660	1:00	0,1	0,160	250,00
3.690	1:30	0,09	0,144	277,78
3.720	2:00	0,09	0,144	277,78
3.750	2:30	0,09	0,144	277,78
3.780	3:00	0,09	0,144	277,78
3.810	3:30	0,09	0,144	277,78
3.840	4:00	0,09	0,144	277,78
3.870	4:30	0,09	0,144	277,78
3.900	5:00	0,08	0,128	312,50
3.960	6:00	0,08	0,128	312,50
4.020	7:00	0,08	0,128	312,50
4.080	8:00	0,08	0,128	312,50
4.140	9:00	0,08	0,128	312,50
4.200	10:00	0,08	0,128	312,50
4.260	11:00	0,08	0,128	312,50
4.320	12:00	0,08	0,128	312,50
4.380	13:00	0,08	0,128	312,50
4.440	14:00	0,08	0,128	312,50
4.500	15:00	0,08	0,128	312,50

Observações:

deformação total (%)	0,400
deformação recuperável (%)	0,272
deformação não recuperável (%)	0,128
recuperação (%)	68,00
M _F (MPa) - após 3 600 s	100,00
M _F (MPa) - após 4 500 s	312,50
declividade "b" da curva de fluência	
1 000 - 3 600 s	0,000

Tabela A18. Resultados do ensaio de fluência estática do corpo-de-prova CP9b - mistura M3.

ENSAIO DE FLUÊNCIA POR COMPRESSÃO UNIAXIAL ESTATICA

mistura	CAP 40/20/15
tensão (MPa)	0,4
data	06.02.02
H _{MÉDIA} (mm)	63,2

FASE DE CARREGAMENTO				
tempo		D _h (mm)	deformação (%)	M _F (MPa)
s	min			
0	0:00	0,00	0,000	-
0,1	0:00	0,24	0,380	105,33
30	0:30	0,27	0,427	93,63
60	1:00	0,27	0,427	93,63
90	1:30	0,28	0,443	90,29
120	2:00	0,28	0,443	90,29
150	2:30	0,28	0,443	90,29
180	3:00	0,28	0,443	90,29
210	3:30	0,28	0,443	90,29
240	4:00	0,28	0,443	90,29
270	4:30	0,29	0,459	87,17
300	5:00	0,29	0,459	87,17
360	6:00	0,29	0,459	87,17
420	7:00	0,29	0,459	87,17
480	8:00	0,29	0,459	87,17
540	9:00	0,29	0,459	87,17
600	10:00	0,29	0,459	87,17
660	11:00	0,29	0,459	87,17
720	12:00	0,29	0,459	87,17
780	13:00	0,29	0,459	87,17
840	14:00	0,30	0,475	84,27
900	15:00	0,30	0,475	84,27
960	16:00	0,30	0,475	84,27
1.020	17:00	0,30	0,475	84,27
1.080	18:00	0,30	0,475	84,27
1.140	19:00	0,30	0,475	84,27
1.200	20:00	0,30	0,475	84,27
1.260	21:00	0,30	0,475	84,27
1.320	22:00	0,30	0,475	84,27
1.380	23:00	0,30	0,475	84,27
1.440	24:00	0,30	0,475	84,27
1.500	25:00	0,30	0,475	84,27
1.560	26:00	0,30	0,475	84,27
1.620	27:00	0,30	0,475	84,27
1.680	28:00	0,30	0,475	84,27
1.740	29:00	0,30	0,475	84,27
1.800	30:00	0,30	0,475	84,27
2.100	35:00	0,30	0,475	84,27
2.400	40:00	0,30	0,475	84,27
2.700	45:00	0,30	0,475	84,27
3.000	50:00	0,30	0,475	84,27
3.300	55:00	0,30	0,475	84,27
3.600	60:00	0,30	0,475	84,27

FASE DE DESCARREGAMENTO				
tempo		D _h (mm)	deformação (%)	M _F (MPa)
s	min			
3.630	0:30	0,17	0,269	148,71
3.660	1:00	0,14	0,222	180,57
3.690	1:30	0,13	0,206	194,46
3.720	2:00	0,13	0,206	194,46
3.750	2:30	0,12	0,190	210,67
3.780	3:00	0,12	0,190	210,67
3.810	3:30	0,12	0,190	210,67
3.840	4:00	0,12	0,190	210,67
3.870	4:30	0,12	0,190	210,67
3.900	5:00	0,12	0,190	210,67
3.960	6:00	0,11	0,174	229,82
4.020	7:00	0,11	0,174	229,82
4.080	8:00	0,11	0,174	229,82
4.140	9:00	0,11	0,174	229,82
4.200	10:00	0,11	0,174	229,82
4.260	11:00	0,11	0,174	229,82
4.320	12:00	0,11	0,174	229,82
4.380	13:00	0,11	0,174	229,82
4.440	14:00	0,11	0,174	229,82
4.500	15:00	0,11	0,174	229,82

Observações:

deformação total (%)	0,475
deformação recuperável (%)	0,301
deformação não recuperável (%)	0,174
recuperação (%)	63,33
M _F (MPa) - após 3 600 s	84,27
M _F (MPa) - após 4 500 s	229,82
declividade "b" da curva de fluência	
1 000 - 3 600 s	0,000

Tabela A19. Resultados do ensaio de fluência estática do corpo-de-prova CP10b - mistura M3.

ENSAIO DE FLUÊNCIA POR COMPRESSÃO UNIAXIAL ESTÁTICA

mistura	CAP 40/20/15
tensão (MPa)	0,4
data	06.02.02
H _{MÉDIA} (mm)	63,0

FASE DE CARREGAMENTO				
tempo		D _h (mm)	deformação (%)	M _F (MPa)
s	min			
0	0:00	0,00	0,000	-
0,1	0:00	0,25	0,397	100,80
30	0:30	0,28	0,444	90,00
60	1:00	0,29	0,460	86,90
90	1:30	0,29	0,460	86,90
120	2:00	0,29	0,460	86,90
150	2:30	0,29	0,460	86,90
180	3:00	0,29	0,460	86,90
210	3:30	0,30	0,476	84,00
240	4:00	0,30	0,476	84,00
270	4:30	0,30	0,476	84,00
300	5:00	0,30	0,476	84,00
360	6:00	0,30	0,476	84,00
420	7:00	0,31	0,492	81,29
480	8:00	0,31	0,492	81,29
540	9:00	0,31	0,492	81,29
600	10:00	0,31	0,492	81,29
660	11:00	0,31	0,492	81,29
720	12:00	0,31	0,492	81,29
780	13:00	0,31	0,492	81,29
840	14:00	0,31	0,492	81,29
900	15:00	0,31	0,492	81,29
960	16:00	0,31	0,492	81,29
1.020	17:00	0,31	0,492	81,29
1.080	18:00	0,31	0,492	81,29
1.140	19:00	0,31	0,492	81,29
1.200	20:00	0,31	0,492	81,29
1.260	21:00	0,32	0,508	78,75
1.320	22:00	0,32	0,508	78,75
1.380	23:00	0,32	0,508	78,75
1.440	24:00	0,32	0,508	78,75
1.500	25:00	0,32	0,508	78,75
1.560	26:00	0,32	0,508	78,75
1.620	27:00	0,32	0,508	78,75
1.680	28:00	0,32	0,508	78,75
1.740	29:00	0,32	0,508	78,75
1.800	30:00	0,32	0,508	78,75
2.100	35:00	0,32	0,508	78,75
2.400	40:00	0,32	0,508	78,75
2.700	45:00	0,32	0,508	78,75
3.000	50:00	0,32	0,508	78,75
3.300	55:00	0,32	0,508	78,75
3.600	60:00	0,32	0,508	78,75

FASE DE DESCARREGAMENTO				
tempo		D _h (mm)	deformação (%)	M _F (MPa)
s	min			
3.630	0:30	0,16	0,254	157,50
3.660	1:00	0,15	0,238	168,00
3.690	1:30	0,15	0,238	168,00
3.720	2:00	0,14	0,222	180,00
3.750	2:30	0,14	0,222	180,00
3.780	3:00	0,14	0,222	180,00
3.810	3:30	0,14	0,222	180,00
3.840	4:00	0,14	0,222	180,00
3.870	4:30	0,13	0,206	193,85
3.900	5:00	0,13	0,206	193,85
3.960	6:00	0,13	0,206	193,85
4.020	7:00	0,13	0,206	193,85
4.080	8:00	0,13	0,206	193,85
4.140	9:00	0,13	0,206	193,85
4.200	10:00	0,12	0,190	210,00
4.260	11:00	0,12	0,190	210,00
4.320	12:00	0,12	0,190	210,00
4.380	13:00	0,12	0,190	210,00
4.440	14:00	0,12	0,190	210,00
4.500	15:00	0,12	0,190	210,00

Observações:

deformação total (%)	0,508
deformação recuperável (%)	0,317
deformação não recuperável (%)	0,190
recuperação (%)	62,50
M _F (MPa) - após 3 600 s	78,75
M _F (MPa) - após 4 500 s	210,00
declividade "b" da curva de fluência	
1 000 - 3 600 s	0,016

Tabela A20. Resultados do ensaio de fluência estática do corpo-de-prova CP11b - mistura M3.

ENSAIO DE FLUÊNCIA POR COMPRESSÃO UNIAXIAL ESTÁTICA

mistura	CAP 40/20/15
tensão (MPa)	0,4
data	07.02.02
H _{MÉDIA} (mm)	63,4

FASE DE CARREGAMENTO				
tempo		D _b (mm)	deformação (%)	M _F (MPa)
s	min			
0	0:00	0,00	0,000	-
0,1	0:00	0,23	0,363	110,26
30	0:30	0,26	0,410	97,54
60	1:00	0,27	0,426	93,93
90	1:30	0,27	0,426	93,93
120	2:00	0,27	0,426	93,93
150	2:30	0,27	0,426	93,93
180	3:00	0,27	0,426	93,93
210	3:30	0,28	0,442	90,57
240	4:00	0,28	0,442	90,57
270	4:30	0,28	0,442	90,57
300	5:00	0,28	0,442	90,57
360	6:00	0,28	0,442	90,57
420	7:00	0,28	0,442	90,57
480	8:00	0,28	0,442	90,57
540	9:00	0,28	0,442	90,57
600	10:00	0,28	0,442	90,57
660	11:00	0,28	0,442	90,57
720	12:00	0,28	0,442	90,57
780	13:00	0,28	0,442	90,57
840	14:00	0,28	0,442	90,57
900	15:00	0,28	0,442	90,57
960	16:00	0,28	0,442	90,57
1.020	17:00	0,29	0,457	87,45
1.080	18:00	0,29	0,457	87,45
1.140	19:00	0,29	0,457	87,45
1.200	20:00	0,29	0,457	87,45
1.260	21:00	0,29	0,457	87,45
1.320	22:00	0,29	0,457	87,45
1.380	23:00	0,29	0,457	87,45
1.440	24:00	0,29	0,457	87,45
1.500	25:00	0,29	0,457	87,45
1.560	26:00	0,29	0,457	87,45
1.620	27:00	0,29	0,457	87,45
1.680	28:00	0,29	0,457	87,45
1.740	29:00	0,29	0,457	87,45
1.800	30:00	0,29	0,457	87,45
2.100	35:00	0,29	0,457	87,45
2.400	40:00	0,29	0,457	87,45
2.700	45:00	0,29	0,457	87,45
3.000	50:00	0,29	0,457	87,45
3.300	55:00	0,29	0,457	87,45
3.600	60:00	0,29	0,457	87,45

FASE DE DESCARREGAMENTO				
tempo		D _b (mm)	deformação (%)	M _F (MPa)
s	min			
3.630	0:30	0,15	0,237	169,07
3.660	1:00	0,13	0,205	195,08
3.690	1:30	0,12	0,189	211,33
3.720	2:00	0,11	0,174	230,55
3.750	2:30	0,11	0,174	230,55
3.780	3:00	0,11	0,174	230,55
3.810	3:30	0,1	0,158	253,60
3.840	4:00	0,1	0,158	253,60
3.870	4:30	0,1	0,158	253,60
3.900	5:00	0,1	0,158	253,60
3.960	6:00	0,09	0,142	281,78
4.020	7:00	0,09	0,142	281,78
4.080	8:00	0,09	0,142	281,78
4.140	9:00	0,09	0,142	281,78
4.200	10:00	0,09	0,142	281,78
4.260	11:00	0,09	0,142	281,78
4.320	12:00	0,09	0,142	281,78
4.380	13:00	0,09	0,142	281,78
4.440	14:00	0,08	0,126	317,00
4.500	15:00	0,08	0,126	317,00

Observações:

deformação total (%)	0,457
deformação recuperável (%)	0,331
deformação não recuperável (%)	0,126
recuperação (%)	72,41
M _F (MPa) - após 3 600 s	87,45
M _F (MPa) - após 4 500 s	317,00
declividade "b" da curva de fluência	
1 000 - 3 600 s	0,000

Tabela A21. Resultados do ensaio de fluência estática do corpo-de-prova CP4 - mistura M1.

ENSAIO DE FLUÊNCIA POR COMPRESSÃO UNIAXIAL ESTÁTICA

mistura	CAP 40 puro
tensão (MPa)	0,7
data	17.01.02
Ho (mm)	61,5

FASE DE CARREGAMENTO				
tempo		D _h (mm)	deformação (%)	M _F (MPa)
s	min			
0	0:00	0,00	0,000	-
0,1	0:00	0,39	0,634	110,38
30	0:30	0,44	0,715	97,84
60	1:00	0,45	0,732	95,67
90	1:30	0,45	0,732	95,67
120	2:00	0,46	0,748	93,59
150	2:30	0,46	0,748	93,59
180	3:00	0,46	0,748	93,59
210	3:30	0,46	0,748	93,59
240	4:00	0,46	0,748	93,59
270	4:30	0,47	0,764	91,60
300	5:00	0,47	0,764	91,60
360	6:00	0,47	0,764	91,60
420	7:00	0,47	0,764	91,60
480	8:00	0,47	0,764	91,60
540	9:00	0,47	0,764	91,60
600	10:00	0,48	0,780	89,69
660	11:00	0,48	0,780	89,69
720	12:00	0,48	0,780	89,69
780	13:00	0,48	0,780	89,69
840	14:00	0,48	0,780	89,69
900	15:00	0,48	0,780	89,69
960	16:00	0,48	0,780	89,69
1.020	17:00	0,48	0,780	89,69
1.080	18:00	0,48	0,780	89,69
1.140	19:00	0,48	0,780	89,69
1.200	20:00	0,48	0,780	89,69
1.260	21:00	0,48	0,780	89,69
1.320	22:00	0,49	0,797	87,86
1.380	23:00	0,49	0,797	87,86
1.440	24:00	0,49	0,797	87,86
1.500	25:00	0,49	0,797	87,86
1.560	26:00	0,49	0,797	87,86
1.620	27:00	0,49	0,797	87,86
1.680	28:00	0,49	0,797	87,86
1.740	29:00	0,49	0,797	87,86
1.800	30:00	0,49	0,797	87,86
2.100	35:00	0,49	0,797	87,86
2.400	40:00	0,49	0,797	87,86
2.700	45:00	0,49	0,797	87,86
3.000	50:00	0,49	0,797	87,86
3.300	55:00	0,50	0,813	86,10
3.600	60:00	0,50	0,813	86,10

FASE DE DESCARREGAMENTO				
tempo		D _h (mm)	deformação (%)	M _F (MPa)
s	min			
3.630	0:30	0,28	0,455	153,75
3.660	1:00	0,27	0,439	159,44
3.690	1:30	0,27	0,439	159,44
3.720	2:00	0,27	0,439	159,44
3.750	2:30	0,27	0,439	159,44
3.780	3:00	0,26	0,423	165,58
3.810	3:30	0,26	0,423	165,58
3.840	4:00	0,26	0,423	165,58
3.870	4:30	0,26	0,423	165,58
3.900	5:00	0,26	0,423	165,58
3.960	6:00	0,26	0,423	165,58
4.020	7:00	0,26	0,423	165,58
4.080	8:00	0,26	0,423	165,58
4.140	9:00	0,26	0,423	165,58
4.200	10:00	0,26	0,423	165,58
4.260	11:00	0,25	0,407	172,20
4.320	12:00	0,25	0,407	172,20
4.380	13:00	0,25	0,407	172,20
4.440	14:00	0,25	0,407	172,20
4.500	15:00	0,25	0,407	172,20

Observações:

1. Corpo-de-prova utilizado no ensaio de módulo de resiliência.

deformação total (%)	0,813
deformação recuperável (%)	0,407
deformação não recuperável (%)	0,407
recuperação (%)	50,00
M _F (MPa) - após 3 600 s	86,10
M _F (MPa) - após 4 500 s	172,20
declividade "b" da curva de fluência	
1 000 - 3 600 s	0,033

Tabela A22. Resultados do ensaio de fluência estática do corpo-de-prova CP5 - mistura M1.

ENSAIO DE FLUÊNCIA POR COMPRESSÃO UNIAXIAL ESTÁTICA

mistura	CAP 40 puro
tensão (MPa)	0,7
data	17.01.02
Ho (mm)	61,8

FASE DE CARREGAMENTO				
tempo		D _h	deformação	M _F
s	min	(mm)	(%)	(MPa)
0	0:00	0,00	0,000	-
0,1	0:00	0,29	0,469	149,17
30	0:30	0,32	0,518	135,19
60	1:00	0,33	0,534	131,09
90	1:30	0,34	0,550	127,24
120	2:00	0,34	0,550	127,24
150	2:30	0,35	0,566	123,60
180	3:00	0,35	0,566	123,60
210	3:30	0,35	0,566	123,60
240	4:00	0,35	0,566	123,60
270	4:30	0,36	0,583	120,17
300	5:00	0,36	0,583	120,17
360	6:00	0,36	0,583	120,17
420	7:00	0,36	0,583	120,17
480	8:00	0,36	0,583	120,17
540	9:00	0,37	0,599	116,92
600	10:00	0,37	0,599	116,92
660	11:00	0,37	0,599	116,92
720	12:00	0,37	0,599	116,92
780	13:00	0,37	0,599	116,92
840	14:00	0,37	0,599	116,92
900	15:00	0,37	0,599	116,92
960	16:00	0,38	0,615	113,84
1.020	17:00	0,38	0,615	113,84
1.080	18:00	0,38	0,615	113,84
1.140	19:00	0,38	0,615	113,84
1.200	20:00	0,38	0,615	113,84
1.260	21:00	0,38	0,615	113,84
1.320	22:00	0,38	0,615	113,84
1.380	23:00	0,38	0,615	113,84
1.440	24:00	0,38	0,615	113,84
1.500	25:00	0,38	0,615	113,84
1.560	26:00	0,38	0,615	113,84
1.620	27:00	0,38	0,615	113,84
1.680	28:00	0,39	0,631	110,92
1.740	29:00	0,39	0,631	110,92
1.800	30:00	0,39	0,631	110,92
2.100	35:00	0,39	0,631	110,92
2.400	40:00	0,39	0,631	110,92
2.700	45:00	0,39	0,631	110,92
3.000	50:00	0,40	0,647	108,15
3.300	55:00	0,40	0,647	108,15
3.600	60:00	0,40	0,647	108,15

FASE DE DESCARREGAMENTO				
tempo		D _h	deformação	M _F
s	min	(mm)	(%)	(MPa)
3.630	0:30	0,17	0,275	254,47
3.660	1:00	0,16	0,259	270,38
3.690	1:30	0,15	0,243	288,40
3.720	2:00	0,15	0,243	288,40
3.750	2:30	0,15	0,243	288,40
3.780	3:00	0,15	0,243	288,40
3.810	3:30	0,15	0,243	288,40
3.840	4:00	0,14	0,227	309,00
3.870	4:30	0,14	0,227	309,00
3.900	5:00	0,14	0,227	309,00
3.960	6:00	0,14	0,227	309,00
4.020	7:00	0,14	0,227	309,00
4.080	8:00	0,14	0,227	309,00
4.140	9:00	0,14	0,227	309,00
4.200	10:00	0,14	0,227	309,00
4.260	11:00	0,13	0,210	332,77
4.320	12:00	0,13	0,210	332,77
4.380	13:00	0,13	0,210	332,77
4.440	14:00	0,13	0,210	332,77
4.500	15:00	0,13	0,210	332,77

Observações:

1. Corpo-de-prova utilizado no ensaio de módulo de resiliência.

deformação total (%)	0,647
deformação recuperável (%)	0,437
deformação não recuperável (%)	0,210
recuperação (%)	67,50
M _F (MPa) - após 3 600 s	108,15
M _F (MPa) - após 4 500 s	332,77
declividade "b" da curva de fluência	
1 000 - 3 600 s	0,032

Tabela A23. Resultados do ensaio de fluência estática do corpo-de-prova CP6 - mistura M1.

ENSAIO DE FLUÊNCIA POR COMPRESSÃO UNIAXIAL ESTÁTICA

mistura	CAP 40 puro
tensão (MPa)	0,7
data	17.01.02
H ₀ (mm)	61,7

FASE DE CARREGAMENTO				
tempo		D _h	deformação	M _F
s	min	(mm)	(%)	(MPa)
0	0:00	0,00	0,000	-
0,1	0:00	0,28	0,454	154,25
30	0:30	0,32	0,519	134,97
60	1:00	0,33	0,535	130,88
90	1:30	0,33	0,535	130,88
120	2:00	0,34	0,551	127,03
150	2:30	0,34	0,551	127,03
180	3:00	0,34	0,551	127,03
210	3:30	0,35	0,567	123,40
240	4:00	0,35	0,567	123,40
270	4:30	0,35	0,567	123,40
300	5:00	0,35	0,567	123,40
360	6:00	0,36	0,583	119,97
420	7:00	0,36	0,583	119,97
480	8:00	0,37	0,600	116,73
540	9:00	0,37	0,600	116,73
600	10:00	0,37	0,600	116,73
660	11:00	0,37	0,600	116,73
720	12:00	0,37	0,600	116,73
780	13:00	0,37	0,600	116,73
840	14:00	0,38	0,616	113,66
900	15:00	0,38	0,616	113,66
960	16:00	0,38	0,616	113,66
1.020	17:00	0,38	0,616	113,66
1.080	18:00	0,38	0,616	113,66
1.140	19:00	0,38	0,616	113,66
1.200	20:00	0,38	0,616	113,66
1.260	21:00	0,38	0,616	113,66
1.320	22:00	0,38	0,616	113,66
1.380	23:00	0,38	0,616	113,66
1.440	24:00	0,38	0,616	113,66
1.500	25:00	0,38	0,616	113,66
1.560	26:00	0,39	0,632	110,74
1.620	27:00	0,39	0,632	110,74
1.680	28:00	0,39	0,632	110,74
1.740	29:00	0,39	0,632	110,74
1.800	30:00	0,39	0,632	110,74
2.100	35:00	0,39	0,632	110,74
2.400	40:00	0,39	0,632	110,74
2.700	45:00	0,40	0,648	107,98
3.000	50:00	0,40	0,648	107,98
3.300	55:00	0,40	0,648	107,98
3.600	60:00	0,40	0,648	107,98

FASE DE DESCARREGAMENTO				
tempo		D _h	deformação	M _F
s	min	(mm)	(%)	(MPa)
3.630	0:30	0,19	0,308	227,32
3.660	1:00	0,18	0,292	239,94
3.690	1:30	0,17	0,276	254,06
3.720	2:00	0,17	0,276	254,06
3.750	2:30	0,17	0,276	254,06
3.780	3:00	0,17	0,276	254,06
3.810	3:30	0,16	0,259	269,94
3.840	4:00	0,16	0,259	269,94
3.870	4:30	0,16	0,259	269,94
3.900	5:00	0,16	0,259	269,94
3.960	6:00	0,16	0,259	269,94
4.020	7:00	0,16	0,259	269,94
4.080	8:00	0,16	0,259	269,94
4.140	9:00	0,16	0,259	269,94
4.200	10:00	0,16	0,259	269,94
4.260	11:00	0,15	0,243	287,93
4.320	12:00	0,15	0,243	287,93
4.380	13:00	0,15	0,243	287,93
4.440	14:00	0,15	0,243	287,93
4.500	15:00	0,15	0,243	287,93

Observações:

1. Corpo-de-prova utilizado no ensaio de módulo de resiliência.

deformação total (%)	0,648
deformação recuperável (%)	0,405
deformação não recuperável (%)	0,243
recuperação (%)	62,50
M _F (MPa) - após 3 600 s	107,98
M _F (MPa) - após 4 500 s	287,93
declividade "b" da curva de fluência	
1 000 - 3 600 s	0,032

Tabela A24. Resultados do ensaio de fluência estática do corpo-de-prova CP12 - mistura M1.

ENSAIO DE FLUÊNCIA POR COMPRESSÃO UNIAXIAL ESTÁTICA

mistura	CAP 40 puro
tensão (MPa)	0,7
data	08.02.02
Ho (mm)	61,6

FASE DE CARREGAMENTO				
tempo		D _h (mm)	deformação (%)	M _F (MPa)
s	min			
0	0:00	0,00	0,000	-
0,1	0:00	0,29	0,471	148,69
30	0:30	0,32	0,519	134,75
60	1:00	0,33	0,536	130,67
90	1:30	0,33	0,536	130,67
120	2:00	0,34	0,552	126,82
150	2:30	0,34	0,552	126,82
180	3:00	0,34	0,552	126,82
210	3:30	0,35	0,568	123,20
240	4:00	0,35	0,568	123,20
270	4:30	0,35	0,568	123,20
300	5:00	0,35	0,568	123,20
360	6:00	0,35	0,568	123,20
420	7:00	0,36	0,584	119,78
480	8:00	0,36	0,584	119,78
540	9:00	0,36	0,584	119,78
600	10:00	0,36	0,584	119,78
660	11:00	0,36	0,584	119,78
720	12:00	0,36	0,584	119,78
780	13:00	0,36	0,584	119,78
840	14:00	0,36	0,584	119,78
900	15:00	0,37	0,601	116,54
960	16:00	0,37	0,601	116,54
1.020	17:00	0,37	0,601	116,54
1.080	18:00	0,37	0,601	116,54
1.140	19:00	0,37	0,601	116,54
1.200	20:00	0,37	0,601	116,54
1.260	21:00	0,37	0,601	116,54
1.320	22:00	0,37	0,601	116,54
1.380	23:00	0,37	0,601	116,54
1.440	24:00	0,37	0,601	116,54
1.500	25:00	0,37	0,601	116,54
1.560	26:00	0,37	0,601	116,54
1.620	27:00	0,37	0,601	116,54
1.680	28:00	0,37	0,601	116,54
1.740	29:00	0,37	0,601	116,54
1.800	30:00	0,37	0,601	116,54
2.100	35:00	0,38	0,617	113,47
2.400	40:00	0,38	0,617	113,47
2.700	45:00	0,38	0,617	113,47
3.000	50:00	0,38	0,617	113,47
3.300	55:00	0,38	0,617	113,47
3.600	60:00	0,38	0,617	113,47

FASE DE DESCARREGAMENTO				
tempo		D _h (mm)	deformação (%)	M _F (MPa)
s	min			
3.630	0:30	0,16	0,260	269,50
3.660	1:00	0,15	0,244	287,47
3.690	1:30	0,14	0,227	308,00
3.720	2:00	0,14	0,227	308,00
3.750	2:30	0,14	0,227	308,00
3.780	3:00	0,13	0,211	331,69
3.810	3:30	0,13	0,211	331,69
3.840	4:00	0,13	0,211	331,69
3.870	4:30	0,13	0,211	331,69
3.900	5:00	0,13	0,211	331,69
3.960	6:00	0,13	0,211	331,69
4.020	7:00	0,13	0,211	331,69
4.080	8:00	0,12	0,195	359,33
4.140	9:00	0,12	0,195	359,33
4.200	10:00	0,12	0,195	359,33
4.260	11:00	0,12	0,195	359,33
4.320	12:00	0,12	0,195	359,33
4.380	13:00	0,12	0,195	359,33
4.440	14:00	0,12	0,195	359,33
4.500	15:00	0,12	0,195	359,33

Observações:

deformação total (%)	0,617
deformação recuperável (%)	0,422
deformação não recuperável (%)	0,195
recuperação (%)	68,42
M _F (MPa) - após 3 600 s	
M _F (MPa) - após 4 500 s	359,33
declividade "b" da curva de fluência	
1 000 - 3 600 s	0,016

Tabela A25. Resultados do ensaio de fluência estática do corpo-de-prova CP4a - mistura M2.

ENSAIO DE FLUÊNCIA POR COMPRESSÃO UNIAXIAL ESTÁTICA

mistura	CAP 40/12/10
tensão (MPa)	0,7
data	17.01.02
Ho (mm)	62,4

FASE DE CARREGAMENTO				
tempo		D _h (mm)	deformação (%)	M _F (MPa)
s	min			
0	0:00	0,00	0,000	-
0,1	0:00	0,32	0,513	136,50
30	0:30	0,35	0,561	124,80
60	1:00	0,36	0,577	121,33
90	1:30	0,37	0,593	118,05
120	2:00	0,37	0,593	118,05
150	2:30	0,38	0,609	114,95
180	3:00	0,38	0,609	114,95
210	3:30	0,38	0,609	114,95
240	4:00	0,39	0,625	112,00
270	4:30	0,39	0,625	112,00
300	5:00	0,39	0,625	112,00
360	6:00	0,39	0,625	112,00
420	7:00	0,40	0,641	109,20
480	8:00	0,40	0,641	109,20
540	9:00	0,40	0,641	109,20
600	10:00	0,41	0,657	106,54
660	11:00	0,41	0,657	106,54
720	12:00	0,41	0,657	106,54
780	13:00	0,41	0,657	106,54
840	14:00	0,42	0,673	104,00
900	15:00	0,42	0,673	104,00
960	16:00	0,42	0,673	104,00
1.020	17:00	0,42	0,673	104,00
1.080	18:00	0,42	0,673	104,00
1.140	19:00	0,42	0,673	104,00
1.200	20:00	0,43	0,689	101,58
1.260	21:00	0,43	0,689	101,58
1.320	22:00	0,43	0,689	101,58
1.380	23:00	0,43	0,689	101,58
1.440	24:00	0,43	0,689	101,58
1.500	25:00	0,43	0,689	101,58
1.560	26:00	0,43	0,689	101,58
1.620	27:00	0,43	0,689	101,58
1.680	28:00	0,43	0,689	101,58
1.740	29:00	0,44	0,705	99,27
1.800	30:00	0,44	0,705	99,27
2.100	35:00	0,44	0,705	99,27
2.400	40:00	0,44	0,705	99,27
2.700	45:00	0,45	0,721	97,07
3.000	50:00	0,45	0,721	97,07
3.300	55:00	0,45	0,721	97,07
3.600	60:00	0,45	0,721	97,07

FASE DE DESCARREGAMENTO				
tempo		D _h (mm)	deformação (%)	M _F (MPa)
s	min			
3.630	0:30	0,19	0,304	229,89
3.660	1:00	0,18	0,288	242,67
3.690	1:30	0,18	0,288	242,67
3.720	2:00	0,18	0,288	242,67
3.750	2:30	0,18	0,288	242,67
3.780	3:00	0,17	0,272	256,94
3.810	3:30	0,17	0,272	256,94
3.840	4:00	0,17	0,272	256,94
3.870	4:30	0,17	0,272	256,94
3.900	5:00	0,17	0,272	256,94
3.960	6:00	0,17	0,272	256,94
4.020	7:00	0,17	0,272	256,94
4.080	8:00	0,16	0,256	273,00
4.140	9:00	0,16	0,256	273,00
4.200	10:00	0,16	0,256	273,00
4.260	11:00	0,16	0,256	273,00
4.320	12:00	0,16	0,256	273,00
4.380	13:00	0,16	0,256	273,00
4.440	14:00	0,16	0,256	273,00
4.500	15:00	0,16	0,256	273,00

Observações:

1. Corpo-de-prova utilizado no ensaio de módulo de resiliência.

deformação total (%)	0,721
deformação recuperável (%)	0,465
deformação não recuperável (%)	0,256
recuperação (%)	64,44
M _F (MPa) - após 3 600 s	97,07
M _F (MPa) - após 4 500 s	273,00
declividade "b" da curva de fluência	
1 000 - 3 600 s	0,048

Tabela A26. Resultados do ensaio de fluência estática do corpo-de-prova CP5a - mistura M2

ENSAIO DE FLUÊNCIA POR COMPRESSÃO UNIAXIAL ESTÁTICA

mistura	CAP 40/12/10
tensão (MPa)	0,7
data	17.01.02
H ₀ (mm)	62,3

FASE DE CARREGAMENTO				
tempo		D _h	deformação	M _F
s	min	(mm)	(%)	(MPa)
0	0:00	0,00	0,000	-
0,1	0:00	0,36	0,578	121,14
30	0:30	0,39	0,626	111,82
60	1:00	0,41	0,658	106,37
90	1:30	0,42	0,674	103,83
120	2:00	0,42	0,674	103,83
150	2:30	0,43	0,690	101,42
180	3:00	0,43	0,690	101,42
210	3:30	0,44	0,706	99,11
240	4:00	0,44	0,706	99,11
270	4:30	0,44	0,706	99,11
300	5:00	0,44	0,706	99,11
360	6:00	0,45	0,722	96,91
420	7:00	0,45	0,722	96,91
480	8:00	0,46	0,738	94,80
540	9:00	0,46	0,738	94,80
600	10:00	0,46	0,738	94,80
660	11:00	0,47	0,754	92,79
720	12:00	0,47	0,754	92,79
780	13:00	0,47	0,754	92,79
840	14:00	0,48	0,770	90,85
900	15:00	0,48	0,770	90,85
960	16:00	0,48	0,770	90,85
1.020	17:00	0,48	0,770	90,85
1.080	18:00	0,48	0,770	90,85
1.140	19:00	0,48	0,770	90,85
1.200	20:00	0,49	0,787	89,00
1.260	21:00	0,49	0,787	89,00
1.320	22:00	0,49	0,787	89,00
1.380	23:00	0,49	0,787	89,00
1.440	24:00	0,49	0,787	89,00
1.500	25:00	0,49	0,787	89,00
1.560	26:00	0,50	0,803	87,22
1.620	27:00	0,50	0,803	87,22
1.680	28:00	0,50	0,803	87,22
1.740	29:00	0,50	0,803	87,22
1.800	30:00	0,50	0,803	87,22
2.100	35:00	0,51	0,819	85,51
2.400	40:00	0,51	0,819	85,51
2.700	45:00	0,52	0,835	83,87
3.000	50:00	0,52	0,835	83,87
3.300	55:00	0,52	0,835	83,87
3.600	60:00	0,52	0,835	83,87

FASE DE DESCARREGAMENTO				
tempo		D _h	deformação	M _F
s	min	(mm)	(%)	(MPa)
3.630	0:30	0,27	0,433	161,52
3.660	1:00	0,27	0,417	167,73
3.690	1:30	0,27	0,401	174,44
3.720	2:00	0,27	0,401	174,44
3.750	2:30	0,27	0,401	174,44
3.780	3:00	0,27	0,401	174,44
3.810	3:30	0,27	0,401	174,44
3.840	4:00	0,27	0,401	174,44
3.870	4:30	0,27	0,385	181,71
3.900	5:00	0,27	0,385	181,71
3.960	6:00	0,27	0,385	181,71
4.020	7:00	0,27	0,385	181,71
4.080	8:00	0,27	0,385	181,71
4.140	9:00	0,27	0,385	181,71
4.200	10:00	0,27	0,385	181,71
4.260	11:00	0,27	0,385	181,71
4.320	12:00	0,27	0,385	181,71
4.380	13:00	0,27	0,385	181,71
4.440	14:00	0,27	0,385	181,71
4.500	15:00	0,27	0,385	181,71

Observações:

1. Corpo-de-prova utilizado no ensaio de módulo de resiliência.

deformação total (%)	0,835
deformação recuperável (%)	0,449
deformação não recuperável (%)	0,385
recuperação (%)	53,85
M _F (MPa) - após 3 600 s	83,87
M _F (MPa) - após 4 500 s	181,71
declividade "b" da curva de fluência	
1 000 - 3 600 s	0,064

Tabela A27. Resultados do ensaio de fluência estática do corpo-de-prova CP6a - mistura M2.

ENSAIO DE FLUÊNCIA POR COMPRESSÃO UNIAXIAL ESTATICA

mistura	CAP 40/12/10
tensão (MPa)	0,7
data	17.01.02
H ₀ (mm)	62,6

FASE DE CARREGAMENTO				
tempo		D _h	deformação	M _F
s	min	(mm)	(%)	(MPa)
0	0:00	0,00	0,000	-
0,1	0:00	0,49	0,783	89,43
30	0:30	0,51	0,815	85,92
60	1:00	0,52	0,831	84,27
90	1:30	0,52	0,831	84,27
120	2:00	0,53	0,847	82,68
150	2:30	0,53	0,847	82,68
180	3:00	0,53	0,847	82,68
210	3:30	0,53	0,847	82,68
240	4:00	0,54	0,863	81,15
270	4:30	0,54	0,863	81,15
300	5:00	0,54	0,863	81,15
360	6:00	0,54	0,863	81,15
420	7:00	0,54	0,863	81,15
480	8:00	0,54	0,863	81,15
540	9:00	0,54	0,863	81,15
600	10:00	0,55	0,879	79,67
660	11:00	0,55	0,879	79,67
720	12:00	0,55	0,879	79,67
780	13:00	0,55	0,879	79,67
840	14:00	0,55	0,879	79,67
900	15:00	0,55	0,879	79,67
960	16:00	0,55	0,879	79,67
1.020	17:00	0,55	0,879	79,67
1.080	18:00	0,55	0,879	79,67
1.140	19:00	0,55	0,879	79,67
1.200	20:00	0,55	0,879	79,67
1.260	21:00	0,55	0,879	79,67
1.320	22:00	0,56	0,895	78,25
1.380	23:00	0,56	0,895	78,25
1.440	24:00	0,56	0,895	78,25
1.500	25:00	0,56	0,895	78,25
1.560	26:00	0,56	0,895	78,25
1.620	27:00	0,56	0,895	78,25
1.680	28:00	0,56	0,895	78,25
1.740	29:00	0,56	0,895	78,25
1.800	30:00	0,56	0,895	78,25
2.100	35:00	0,56	0,895	78,25
2.400	40:00	0,56	0,895	78,25
2.700	45:00	0,56	0,895	78,25
3.000	50:00	0,56	0,895	78,25
3.300	55:00	0,56	0,895	78,25
3.600	60:00	0,56	0,895	78,25

FASE DE DESCARREGAMENTO				
tempo		D _h	deformação	M _F
s	min	(mm)	(%)	(MPa)
3.630	0:30	0,33	0,527	132,79
3.660	1:00	0,32	0,511	136,94
3.690	1:30	0,32	0,511	136,94
3.720	2:00	0,32	0,511	136,94
3.750	2:30	0,32	0,511	136,94
3.780	3:00	0,32	0,511	136,94
3.810	3:30	0,31	0,495	141,35
3.840	4:00	0,31	0,495	141,35
3.870	4:30	0,31	0,495	141,35
3.900	5:00	0,31	0,495	141,35
3.960	6:00	0,31	0,495	141,35
4.020	7:00	0,31	0,495	141,35
4.080	8:00	0,31	0,495	141,35
4.140	9:00	0,31	0,495	141,35
4.200	10:00	0,31	0,495	141,35
4.260	11:00	0,31	0,495	141,35
4.320	12:00	0,31	0,495	141,35
4.380	13:00	0,3	0,479	146,07
4.440	14:00	0,3	0,479	146,07
4.500	15:00	0,3	0,479	146,07

Observações:

1. Corpo-de-prova utilizado no ensaio de módulo de resiliência.

deformação total (%)	0,895
deformação recuperável (%)	0,415
deformação não recuperável (%)	0,479
recuperação (%)	46,43
M _F (MPa) - após 3 600 s	78,25
M _F (MPa) - após 4 500 s	146,07
declividade "b" da curva de fluência	
1 000 - 3 600 s	0,016

Tabela A28. Resultados do ensaio de fluência estática do corpo-de-prova CP11a - mistura M2.

ENSAIO DE FLUÊNCIA POR COMPRESSÃO UNIAXIAL ESTATICA

mistura	CAP 40/12/10
tensão (MPa)	0,7
data	08.02.02
H ₀ (mm)	62,5

FASE DE CARREGAMENTO				
tempo		D _h	deformação	M _F
s	min	(mm)	(%)	(MPa)
0	0:00	0,00	0,000	-
0,1	0:00	0,43	0,688	101,74
30	0:30	0,46	0,736	95,11
60	1:00	0,46	0,736	95,11
90	1:30	0,47	0,752	93,09
120	2:00	0,48	0,768	91,15
150	2:30	0,48	0,768	91,15
180	3:00	0,48	0,768	91,15
210	3:30	0,48	0,768	91,15
240	4:00	0,48	0,768	91,15
270	4:30	0,49	0,784	89,29
300	5:00	0,49	0,784	89,29
360	6:00	0,49	0,784	89,29
420	7:00	0,49	0,784	89,29
480	8:00	0,49	0,784	89,29
540	9:00	0,49	0,784	89,29
600	10:00	0,49	0,784	89,29
660	11:00	0,49	0,784	89,29
720	12:00	0,50	0,800	87,50
780	13:00	0,50	0,800	87,50
840	14:00	0,50	0,800	87,50
900	15:00	0,50	0,800	87,50
960	16:00	0,50	0,800	87,50
1.020	17:00	0,50	0,800	87,50
1.080	18:00	0,50	0,800	87,50
1.140	19:00	0,50	0,800	87,50
1.200	20:00	0,50	0,800	87,50
1.260	21:00	0,50	0,800	87,50
1.320	22:00	0,50	0,800	87,50
1.380	23:00	0,50	0,800	87,50
1.440	24:00	0,50	0,800	87,50
1.500	25:00	0,50	0,800	87,50
1.560	26:00	0,50	0,800	87,50
1.620	27:00	0,51	0,816	85,78
1.680	28:00	0,51	0,816	85,78
1.740	29:00	0,51	0,816	85,78
1.800	30:00	0,51	0,816	85,78
2.100	35:00	0,51	0,816	85,78
2.400	40:00	0,51	0,816	85,78
2.700	45:00	0,51	0,816	85,78
3.000	50:00	0,51	0,816	85,78
3.300	55:00	0,51	0,816	85,78
3.600	60:00	0,51	0,816	85,78

FASE DE DESCARREGAMENTO				
tempo		D _h	deformação	M _F
s	min	(mm)	(%)	(MPa)
3.630	0:30	0,27	0,432	162,04
3.660	1:00	0,26	0,416	168,27
3.690	1:30	0,26	0,416	168,27
3.720	2:00	0,26	0,416	168,27
3.750	2:30	0,26	0,416	168,27
3.780	3:00	0,25	0,400	175,00
3.810	3:30	0,25	0,400	175,00
3.840	4:00	0,25	0,400	175,00
3.870	4:30	0,25	0,400	175,00
3.900	5:00	0,25	0,400	175,00
3.960	6:00	0,25	0,400	175,00
4.020	7:00	0,25	0,400	175,00
4.080	8:00	0,24	0,384	182,29
4.140	9:00	0,24	0,384	182,29
4.200	10:00	0,24	0,384	182,29
4.260	11:00	0,24	0,384	182,29
4.320	12:00	0,24	0,384	182,29
4.380	13:00	0,24	0,384	182,29
4.440	14:00	0,24	0,384	182,29
4.500	15:00	0,24	0,384	182,29

Observações:

deformação total (%)	0,816
deformação recuperável (%)	0,432
deformação não recuperável (%)	0,384
recuperação (%)	52,94
M _F (MPa) - após 3 600 s	85,78
M _F (MPa) - após 4 500 s	182,29
declividade "b" da curva de fluência	
1 000 - 3 600 s	0,016

Tabela A29. Resultados do ensaio de fluência estática do corpo-de-prova CP6b - mistura M3.

ENSAIO DE FLUÊNCIA POR COMPRESSÃO UNIAXIAL ESTATICA

mistura	CAP 40/20/15
tensão (MPa)	0,7
data	17.01.02
H ₀ (mm)	63,3

FASE DE CARREGAMENTO				
tempo		D _h (mm)	deformação (%)	M _F (MPa)
s	min			
0	0:00	0,00	0,000	-
0,1	0:00	0,34	0,537	130,32
30	0:30	0,36	0,569	123,08
60	1:00	0,37	0,585	119,76
90	1:30	0,38	0,600	116,61
120	2:00	0,38	0,600	116,61
150	2:30	0,39	0,616	113,62
180	3:00	0,39	0,616	113,62
210	3:30	0,39	0,616	113,62
240	4:00	0,40	0,632	110,78
270	4:30	0,40	0,632	110,78
300	5:00	0,40	0,632	110,78
360	6:00	0,40	0,632	110,78
420	7:00	0,41	0,648	108,07
480	8:00	0,41	0,648	108,07
540	9:00	0,41	0,648	108,07
600	10:00	0,41	0,648	108,07
660	11:00	0,41	0,648	108,07
720	12:00	0,42	0,664	105,50
780	13:00	0,42	0,664	105,50
840	14:00	0,42	0,664	105,50
900	15:00	0,42	0,664	105,50
960	16:00	0,42	0,664	105,50
1.020	17:00	0,42	0,664	105,50
1.080	18:00	0,42	0,664	105,50
1.140	19:00	0,42	0,664	105,50
1.200	20:00	0,42	0,664	105,50
1.260	21:00	0,42	0,664	105,50
1.320	22:00	0,43	0,679	103,05
1.380	23:00	0,43	0,679	103,05
1.440	24:00	0,43	0,679	103,05
1.500	25:00	0,43	0,679	103,05
1.560	26:00	0,43	0,679	103,05
1.620	27:00	0,43	0,679	103,05
1.680	28:00	0,43	0,679	103,05
1.740	29:00	0,43	0,679	103,05
1.800	30:00	0,43	0,679	103,05
2.100	35:00	0,44	0,695	100,70
2.400	40:00	0,44	0,695	100,70
2.700	45:00	0,44	0,695	100,70
3.000	50:00	0,44	0,695	100,70
3.300	55:00	0,44	0,695	100,70
3.600	60:00	0,45	0,711	98,47

FASE DE DESCARREGAMENTO				
tempo		D _h (mm)	deformação (%)	M _F (MPa)
s	min			
3.630	0:30	0,2	0,316	221,55
3.660	1:00	0,2	0,316	221,55
3.690	1:30	0,19	0,300	233,21
3.720	2:00	0,19	0,300	233,21
3.750	2:30	0,18	0,284	246,17
3.780	3:00	0,18	0,284	246,17
3.810	3:30	0,18	0,284	246,17
3.840	4:00	0,18	0,284	246,17
3.870	4:30	0,18	0,284	246,17
3.900	5:00	0,18	0,284	246,17
3.960	6:00	0,17	0,269	260,65
4.020	7:00	0,17	0,269	260,65
4.080	8:00	0,17	0,269	260,65
4.140	9:00	0,17	0,269	260,65
4.200	10:00	0,16	0,253	276,94
4.260	11:00	0,16	0,253	276,94
4.320	12:00	0,16	0,253	276,94
4.380	13:00	0,16	0,253	276,94
4.440	14:00	0,16	0,253	276,94
4.500	15:00	0,16	0,253	276,94

Observações:

1. Corpo-de-prova utilizado no ensaio de módulo de resiliência.

deformação total (%)	0,711
deformação recuperável (%)	0,458
deformação não recuperável (%)	0,253
recuperação (%)	64,44
M _F (MPa) - após 3 600 s	
98,47	
M _F (MPa) - após 4 500 s	
276,94	
declividade "b" da curva de fluência	
1 000 - 3 600 s	0,047

Tabela A30. Resultados do ensaio de fluência estática do corpo-de-prova CP7b - mistura M3.

ENSAIO DE FLUÊNCIA POR COMPRESSÃO UNIAXIAL ESTÁTICA

mistura	CAP 40/20/15
tensão (MPa)	0,7
data	17.01.02
H ₀ (mm)	63,3

FASE DE CARREGAMENTO				
tempo		D _h	deformação	M _F
s	min	(mm)	(%)	(MPa)
0	0:00	0,00	0,000	-
0,1	0:00	0,39	0,616	113,62
30	0:30	0,42	0,664	105,50
60	1:00	0,43	0,679	103,05
90	1:30	0,43	0,679	103,05
120	2:00	0,44	0,695	100,70
150	2:30	0,44	0,695	100,70
180	3:00	0,45	0,711	98,47
210	3:30	0,45	0,711	98,47
240	4:00	0,45	0,711	98,47
270	4:30	0,45	0,711	98,47
300	5:00	0,46	0,727	96,33
360	6:00	0,46	0,727	96,33
420	7:00	0,46	0,727	96,33
480	8:00	0,46	0,727	96,33
540	9:00	0,47	0,742	94,28
600	10:00	0,47	0,742	94,28
660	11:00	0,47	0,742	94,28
720	12:00	0,47	0,742	94,28
780	13:00	0,47	0,742	94,28
840	14:00	0,48	0,758	92,31
900	15:00	0,48	0,758	92,31
960	16:00	0,48	0,758	92,31
1.020	17:00	0,48	0,758	92,31
1.080	18:00	0,48	0,758	92,31
1.140	19:00	0,48	0,758	92,31
1.200	20:00	0,48	0,758	92,31
1.260	21:00	0,48	0,758	92,31
1.320	22:00	0,48	0,758	92,31
1.380	23:00	0,49	0,774	90,43
1.440	24:00	0,49	0,774	90,43
1.500	25:00	0,49	0,774	90,43
1.560	26:00	0,49	0,774	90,43
1.620	27:00	0,49	0,774	90,43
1.680	28:00	0,49	0,774	90,43
1.740	29:00	0,49	0,774	90,43
1.800	30:00	0,49	0,774	90,43
2.100	35:00	0,49	0,774	90,43
2.400	40:00	0,50	0,790	88,62
2.700	45:00	0,50	0,790	88,62
3.000	50:00	0,50	0,790	88,62
3.300	55:00	0,51	0,806	86,88
3.600	60:00	0,51	0,806	86,88

FASE DE DESCARREGAMENTO				
tempo		D _h	deformação	M _F
s	min	(mm)	(%)	(MPa)
3.630	0:30	0,22	0,348	201,41
3.660	1:00	0,22	0,348	201,41
3.690	1:30	0,21	0,332	211,00
3.720	2:00	0,21	0,332	211,00
3.750	2:30	0,2	0,316	221,55
3.780	3:00	0,2	0,316	221,55
3.810	3:30	0,2	0,316	221,55
3.840	4:00	0,2	0,316	221,55
3.870	4:30	0,19	0,300	233,21
3.900	5:00	0,19	0,300	233,21
3.960	6:00	0,19	0,300	233,21
4.020	7:00	0,19	0,300	233,21
4.080	8:00	0,19	0,300	233,21
4.140	9:00	0,19	0,300	233,21
4.200	10:00	0,18	0,284	246,17
4.260	11:00	0,18	0,284	246,17
4.320	12:00	0,18	0,284	246,17
4.380	13:00	0,18	0,284	246,17
4.440	14:00	0,18	0,284	246,17
4.500	15:00	0,18	0,284	246,17

Observações:

1. Corpo-de-prova utilizado no ensaio de módulo de resiliência.

deformação total (%)	0,806
deformação recuperável (%)	0,521
deformação não recuperável (%)	0,284
recuperação (%)	64,71
M _F (MPa) - após 3 600 s	86,88
M _F (MPa) - após 4 500 s	246,17
declividade "b" da curva de fluência	
1 000 - 3 600 s	0,047

Tabela A31. Resultados do ensaio de fluência estática do corpo-de-prova CP8b - mistura M3.

ENSAIO DE FLUÊNCIA POR COMPRESSÃO UNIAXIAL ESTATICA

mistura	CAP 40/20/15
tensão (MPa)	0,7
data	17.01.02
H ₀ (mm)	63,7

FASE DE CARREGAMENTO				
tempo		D _h (mm)	deformação (%)	M _F (MPa)
s	min			
0	0:00	0,00	0,000	-
0,1	0:00	0,33	0,518	135,12
30	0:30	0,35	0,549	127,40
60	1:00	0,36	0,565	123,86
90	1:30	0,36	0,565	123,86
120	2:00	0,37	0,581	120,51
150	2:30	0,37	0,581	120,51
180	3:00	0,38	0,597	117,34
210	3:30	0,38	0,597	117,34
240	4:00	0,38	0,597	117,34
270	4:30	0,38	0,597	117,34
300	5:00	0,38	0,597	117,34
360	6:00	0,38	0,597	117,34
420	7:00	0,39	0,612	114,33
480	8:00	0,39	0,612	114,33
540	9:00	0,39	0,612	114,33
600	10:00	0,39	0,612	114,33
660	11:00	0,39	0,612	114,33
720	12:00	0,40	0,628	111,48
780	13:00	0,40	0,628	111,48
840	14:00	0,40	0,628	111,48
900	15:00	0,40	0,628	111,48
960	16:00	0,40	0,628	111,48
1.020	17:00	0,40	0,628	111,48
1.080	18:00	0,40	0,628	111,48
1.140	19:00	0,40	0,628	111,48
1.200	20:00	0,40	0,628	111,48
1.260	21:00	0,40	0,628	111,48
1.320	22:00	0,40	0,628	111,48
1.380	23:00	0,40	0,628	111,48
1.440	24:00	0,40	0,628	111,48
1.500	25:00	0,41	0,644	108,76
1.560	26:00	0,41	0,644	108,76
1.620	27:00	0,41	0,644	108,76
1.680	28:00	0,41	0,644	108,76
1.740	29:00	0,41	0,644	108,76
1.800	30:00	0,41	0,644	108,76
2.100	35:00	0,41	0,644	108,76
2.400	40:00	0,41	0,644	108,76
2.700	45:00	0,42	0,659	106,17
3.000	50:00	0,42	0,659	106,17
3.300	55:00	0,42	0,659	106,17
3.600	60:00	0,42	0,659	106,17

FASE DE DESCARREGAMENTO				
tempo		D _h (mm)	deformação (%)	M _F (MPa)
s	min			
3.630	0:30	0,16	0,251	278,69
3.660	1:00	0,15	0,235	297,27
3.690	1:30	0,14	0,220	318,50
3.720	2:00	0,14	0,220	318,50
3.750	2:30	0,14	0,220	318,50
3.780	3:00	0,14	0,220	318,50
3.810	3:30	0,13	0,204	343,00
3.840	4:00	0,13	0,204	343,00
3.870	4:30	0,13	0,204	343,00
3.900	5:00	0,13	0,204	343,00
3.960	6:00	0,13	0,204	343,00
4.020	7:00	0,12	0,188	371,58
4.080	8:00	0,12	0,188	371,58
4.140	9:00	0,12	0,188	371,58
4.200	10:00	0,12	0,188	371,58
4.260	11:00	0,12	0,188	371,58
4.320	12:00	0,12	0,188	371,58
4.380	13:00	0,12	0,188	371,58
4.440	14:00	0,11	0,173	405,36
4.500	15:00	0,11	0,173	405,36

deformação total (%)	0,659
deformação recuperável (%)	0,487
deformação não recuperável (%)	0,173
recuperação (%)	73,81
M _F (MPa) - após 3 600 s	106,17
M _F (MPa) - após 4 500 s	405,36
declividade "b" da curva de fluência	
1 000 - 3 600 s	0,031

ANEXO B

Resultados do teste de Grubbs para identificação de “outliers”.

Tabela B1 - Dosagem Marshall da mistura M1.

data da dosagem: 13 de Novembro de 2001
 agregado mineral: Pedreira Enderp, Ribeirão Preto
 cimento asfáltico: CAP 40 puro

teor de asfalto (superfície específica)	5,50
densidade agregado mineral (g/cm³)	2,833
densidade do CAP (g/cm³)	1,004
constante do anel (kgf/0,001")	45,5

C. P.	teor de CAP (%)	Pcp (ar - g)	Pcp (im - g)	Vcp (cm³)	Da	Dt (g/cm³)	Vv (%)	RBV (%)	deformação (0,01")	carga (kgf)	correção	EM (kgf)	FM (0,01")
1	4,50	1.232,22	737,00	495,22	2,488	2,618	4,97	69,17	29,20	1.328,60	1,09	1.448,17	12,00
2	4,50	1.234,57	729,30	505,27	2,443	2,618	6,68	62,10	27,90	1.269,45	1,04	1.320,23	13,00
3	4,50	1.234,07	731,50	502,57	2,456	2,618	6,22	63,89	30,10	1.369,55	1,04	1.424,33	12,00
média					2,462	2,618	5,96	65,06				1.397,58	12,33
4	5,00	1.237,66	738,50	499,16	2,479	2,596	4,51	73,26	23,70	1.078,35	1,04	1.121,48	14,00
5	5,00	1.234,26	735,30	498,96	2,474	2,596	4,73	72,25	22,00	1.001,00	1,04	1.041,04	13,00
6	5,00	1.232,44	734,70	497,74	2,476	2,596	4,64	72,67	25,40	1.155,70	1,04	1.201,93	15,00
média					2,476	2,596	4,63	72,73				1.121,48	14,00
7	5,50	1.244,02	746,10	497,92	2,498	2,575	2,97	82,15	25,30	1.151,15	1,04	1.197,20	14,00
8	5,50	1.241,20	739,40	501,80	2,473	2,575	3,94	77,46	21,40	973,70	1,04	1.012,65	15,00
9	5,50	1.246,38	746,00	500,38	2,491	2,575	3,27	80,68	22,70	1.032,85	1,04	1.074,16	16,00
média					2,488	2,575	3,39	80,10				1.094,67	15,00
10	6,00	1.244,30	742,20	502,10	2,478	2,554	2,96	83,33	18,80	855,40	1,04	889,62	20,00
11	6,00	1.238,80	743,50	495,30	2,501	2,554	2,07	87,86	21,70	987,35	1,09	1.076,21	17,00
12	6,00	1.237,96	743,90	494,06	2,506	2,554	1,89	88,81	19,70	896,35	1,09	977,02	18,00
média					2,495	2,55	2,30	86,67				980,95	18,33
13	6,50	1.230,02	734,50	495,52	2,482	2,533	2,00	88,91	17,70	805,35	1,04	837,56	18,00
14	6,50	1.242,19	742,40	499,79	2,485	2,533	1,88	89,54	18,20	828,10	1,04	861,22	18,00
15	6,50	1.243,91	742,00	501,91	2,478	2,533	2,16	88,14	18,10	823,55	1,04	856,49	18,00
média					2,482	2,533	2,01	88,86				851,76	18,00

Tabela B2. Identificação de “outliers” – mistura M1.

parâmetro	Da	Vv (%)	RBV (%)	EM (kgf)	FM (0,01")
teor	4,5				
média	2,462	5,96	65,06	1398	12
desvio padrão	0,023	0,886	3,675	68,040	0,577
GMAIOR	1,11	0,82	1,12	0,74	1,15
GMENOR	0,82	1,11	0,80	1,14	0,58
GCRÍTICO(95%)	1,15	1,15	1,15	1,15	1,15
Y MÁXIMO	2,488	6,68	69,17	1448	13
Y MÍNIMO	2,443	4,97	62,10	1320	12
teor	5,0				
média	2,476	4,63	72,73	1121	14
desvio padrão	0,003	0,113	0,507	80,444	1,000
GMAIOR	1,05	0,94	1,05	1,00	1,00
GMENOR	0,94	1,05	0,94	1,00	1,00
GCRÍTICO(95%)	1,15	1,15	1,15	1,15	1,15
Y MÁXIMO	2,479	4,73	73,26	1202	15
Y MÍNIMO	2,474	4,51	72,25	1041	13
teor	5,5				
média	2,488	3,39	80,10	1095	15
desvio padrão	0,013	0,497	2,397	93,967	1,000
GMAIOR	0,85	1,10	0,86	1,09	1,00
GMENOR	1,10	0,85	1,10	0,87	1,00
GCRÍTICO(95%)	1,15	1,15	1,15	1,15	1,15
Y MÁXIMO	2,498	3,94	82,15	1197	16
Y MÍNIMO	2,473	2,97	77,46	1013	14
teor	6,0				
média	2,495	2,30	86,67	981	18
desvio padrão	0,015	0,577	2,930	93,360	1,528
GMAIOR	0,73	1,14	0,73	1,02	1,09
GMENOR	1,14	0,73	1,14	0,98	0,87
GCRÍTICO(95%)	1,15	1,15	1,15	1,15	1,15
Y MÁXIMO	2,506	2,96	88,81	1076	20
Y MÍNIMO	2,478	1,89	83,33	890	17
teor	6,5				
média	2,482	2,01	88,86	852	18
desvio padrão	0,004	0,140	0,701	12,520	0,000
GMAIOR	0,96	1,03	0,96	0,76	1,06
GMENOR	1,03	0,96	1,03	1,13	0,53
GCRÍTICO(95%)	1,15	1,15	1,15	1,15	1,15
Y MÁXIMO	2,485	2,16	89,54	861	18
Y MÍNIMO	2,478	1,88	88,14	838	18

Tabela B3 - Dosagem Marshall da mistura M2.

data da dosagem: 20 de Novembro de 2001
 agregado mineral: Pedreira Enderp, Ribeirão Preto
 cimento asfáltico: CAP 40 + 12% borracha + 10% AR-5

teor de asfalto (superfície específica)	6,00
densidade agregado mineral (g/cm³)	2,833
densidade do CAP (g/cm³)	1,033
constante do anel (kgf/0,001")	45,5

C. P.	teor de CAP (%)	Pcp (ar - g)	Pcp (im - g)	Vcp (cm³)	Da	Dt (g/cm³)	Vv (%)	RBV (%)	deformação (0,01")	carga (kgf)	correção	EM (kgf)	FM (0,01")
1	5,00	1.238,06	740,10	497,96	2,486	2,606	4,59	72,38	27,50	1.251,25	1,04	1.301,30	13
2	5,00	1.238,29	736,70	501,59	2,469	2,606	5,27	69,41	23,10	1.051,05	1,04	1.093,09	12
3	5,00	1.230,65	726,30	504,35	2,440	2,606	6,37	64,98	17,00	773,50	1,04	804,44	13
média					2,465	2,606	5,41	68,92				1.066,28	12,67
4	5,50	1.234,44	738,10	496,34	2,487	2,585	3,80	77,72	20,40	928,20	1,04	965,33	13
5	5,50	1.237,46	734,20	503,26	2,459	2,585	4,89	72,82	19,40	882,70	1,04	918,01	14
6	5,50	1.239,75	735,70	504,05	2,460	2,585	4,86	72,93	20,00	910,00	1,04	946,40	14
média					2,469	2,585	4,51	74,49				943,25	13,67
7	6,00	1.246,72	741,20	505,52	2,466	2,565	3,85	78,84	17,00	773,50	1,04	804,44	14
8	6,00	1.242,80	738,60	504,20	2,465	2,565	3,90	78,60	17,50	796,25	1,04	828,10	15
9*	6,00	1.248,24	740,20	508,04	2,457	2,565	4,21	77,24	15,40	700,70	1,00	700,70	15
média					2,466	2,565	3,87	78,23				816,27	14,67
10*	6,50	1.244,27	743,30	500,97	2,484	2,545	2,40	86,69	14,40	655,20	1,04	681,41	16
11	6,50	1.227,67	728,50	499,17	2,459	2,545	3,35	82,19	15,60	709,80	1,04	738,19	15
12	6,50	1.255,87	744,40	511,47	2,455	2,545	3,51	81,48	14,40	655,20	1,00	655,20	15
média					2,457	2,54	3,43	81,83				691,60	15,33
13	7,00	1.251,70	739,30	512,40	2,443	2,525	3,26	83,57	13,10	596,05	1,00	596,05	18
14	7,00	1.258,47	734,00	524,47	2,400	2,525	4,97	76,59	8,90	404,95	0,96	388,75	18
15	7,00	1.249,98	736,00	513,98	2,432	2,525	3,69	81,73	11,00	500,50	1,00	500,50	19
média					2,425	2,525	3,97	80,63				495,10	18,33

Obs.: Os valores em negrito e itálico são "outliers".

Tabela B4. Identificação de "outliers" – mistura M2.

parâmetro	Da	Vv (%)	RBV (%)	EM (kgf)	FM (0,01")
teor	4,5				
média	2,462	5,96	65,06	1398	12
desvio padrão	0,023	0,886	3,675	68,040	0,577
GMAIOR	1,11	0,82	1,12	0,74	1,15
GMENOR	0,82	1,11	0,80	1,14	0,58
GCRÍTICO(95%)	1,15	1,15	1,15	1,15	1,15
YMÁXIMO	2,488	6,68	69,17	1448	13
YMÍNIMO	2,443	4,97	62,10	1320	12
teor	5,0				
média	2,476	4,63	72,73	1121	14
desvio padrão	0,003	0,113	0,507	80,444	1,000
GMAIOR	1,05	0,94	1,05	1,00	1,00
GMENOR	0,94	1,05	0,94	1,00	1,00
GCRÍTICO(95%)	1,15	1,15	1,15	1,15	1,15
YMÁXIMO	2,479	4,73	73,26	1202	15
YMÍNIMO	2,474	4,51	72,25	1041	13
teor	5,5				
média	2,488	3,39	80,10	1095	15
desvio padrão	0,013	0,497	2,397	93,967	1,000
GMAIOR	0,85	1,10	0,86	1,09	1,00
GMENOR	1,10	0,85	1,10	0,87	1,00
GCRÍTICO(95%)	1,15	1,15	1,15	1,15	1,15
YMÁXIMO	2,498	3,94	82,15	1197	16
YMÍNIMO	2,473	2,97	77,46	1013	14
teor	6,0				
média	2,495	2,30	86,67	981	18
desvio padrão	0,015	0,577	2,930	93,360	1,528
GMAIOR	0,73	1,14	0,73	1,02	1,09
GMENOR	1,14	0,73	1,14	0,98	0,87
GCRÍTICO(95%)	1,15	1,15	1,15	1,15	1,15
YMÁXIMO	2,506	2,96	88,81	1076	20
YMÍNIMO	2,478	1,89	83,33	890	17
teor	6,5				
média	2,482	2,01	88,86	852	18
desvio padrão	0,004	0,140	0,701	12,520	0,000
GMAIOR	0,96	1,03	0,96	0,76	1,06
GMENOR	1,03	0,96	1,03	1,13	0,53
GCRÍTICO(95%)	1,15	1,15	1,15	1,15	1,15
YMÁXIMO	2,485	2,16	89,54	861	18
YMÍNIMO	2,478	1,88	88,14	838	18

Tabela B5 - Dosagem Marshall da mistura M3.

data da dosagem: 27 de Novembro de 2001
 agregado mineral: Pedreira Enderp, Ribeirão Preto
 cimento asfáltico: CAP 40 + 20% borracha + 15% AR-5

teor de asfalto (superfície específica)	6,00
densidade agregado mineral (g/cm³)	2,833
densidade do CAP (g/cm³)	1,039
constante do anel (kgf/0,001")	45,5

C. P.	teor de CAP (%)	Pcp (ar - g)	Pcp (im - g)	Vcp (cm³)	Da	Dt (g/cm³)	Vv (%)	RBV (%)	deformação (0,01")	carga (kgf)	correção	EM (kgf)	FM (0,01")
1	5,00	1.241,85	728,60	513,25	2,420	2,608	7,22	61,73	21,00	955,50	1,00	955,50	16
2	5,00	1.240,68	724,30	516,38	2,403	2,608	7,87	59,50	21,40	973,70	1,00	973,70	13
3	5,00	1.238,20	725,40	512,80	2,415	2,608	7,41	61,06	19,40	882,70	1,00	882,70	13
média					2,412	2,608	7,50	60,76				937,30	14,00
4*	5,50	1.337,60	793,10	544,50	2,457	2,587	5,05	72,02	34,10	1.551,55	0,93	1.442,94	14
5	5,50	1.252,81	736,70	516,11	2,427	2,587	6,18	67,53	18,50	841,75	1,00	841,75	15
6	5,50	1.229,07	723,80	505,27	2,433	2,587	5,98	68,28	19,40	882,70	1,04	918,01	13
média					2,430	2,587	6,08	67,90				879,88	14,00
7	6,00	1.253,42	740,70	512,72	2,445	2,567	4,77	74,75	19,80	900,90	1,00	900,90	15
8	6,00	1.244,25	736,80	507,45	2,452	2,567	4,48	75,95	20,00	910,00	1,04	946,40	14
9	6,00	1.246,38	736,00	510,38	2,442	2,567	4,87	74,33	18,40	837,20	1,00	837,20	18
média					2,446	2,567	4,71	75,01				894,83	15,67
10	6,50	1.255,20	744,60	510,60	2,458	2,547	3,49	81,51	19,40	882,70	1,00	882,70	16
11	6,50	1.258,41	746,50	511,91	2,458	2,547	3,49	81,51	18,50	841,75	1,00	841,75	16
12*	6,50	1.251,91	741,50	510,41	2,453	2,547	3,71	80,55	19,00	864,50	1,00	864,50	18
média					2,458	2,55	3,49	81,51				862,98	16,00
13*	7,00	1.252,10	741,20	510,90	2,451	2,528	3,04	84,47	16,20	737,10	1,00	737,10	18
14	7,00	1.263,29	745,10	518,19	2,438	2,528	3,55	82,24	15,20	691,60	1,00	691,60	17
15	7,00	1.266,91	749,20	517,71	2,447	2,528	3,18	83,83	14,60	664,30	1,00	664,30	17
média					2,445	2,528	3,25	83,52				697,67	17,00

Obs.: Os valores em negrito e itálico são "outliers".

Tabela B6. Identificação de "outliers" – mistura M3.

parâmetro	Da	Vv (%)	RBV (%)	EM (kgf)	FM (0,01")
-----------	----	--------	---------	----------	------------

teor	5,0				
média	2,412	7,50	60,76	937	14
desvio padrão	0,009	0,334	1,140	48,153	1,732
GMAIOR	0,84	1,11	0,85	0,76	1,15
GMENOR	1,11	0,84	1,10	1,13	0,58
GCRÍTICO(95%)	1,15	1,15	1,15	1,15	1,15
Y MÁXIMO	2,420	7,87	61,73	974	16
Y MÍNIMO	2,403	7,22	59,50	883	13

teor	5,5				
média	2,439	5,74	69,27	1.068	14
desvio padrão	0,016	0,602	2,406	327,313	1,000
GMAIOR	1,14	0,73	1,14	1,15	1,00
GMENOR	0,73	1,14	0,73	0,69	1,00
GCRÍTICO(95%)	1,15	1,15	1,15	1,15	1,15
Y MÁXIMO	2,457	6,18	72,02	1.443	15
Y MÍNIMO	2,427	5,05	67,53	842	13

teor	6,0				
média	2,446	4,71	75,01	895	16
desvio padrão	0,005	0,200	0,839	54,852	2,082
GMAIOR	1,12	0,81	1,12	0,94	1,12
GMENOR	0,81	1,12	0,81	1,05	0,80
GCRÍTICO(95%)	1,15	1,15	1,15	1,15	1,15
Y MÁXIMO	2,452	4,87	75,95	946	18
Y MÍNIMO	2,442	4,48	74,33	837	14

teor	6,5				
média	2,456	3,56	81,19	863	17
desvio padrão	0,003	0,125	0,555	20,517	1,155
GMAIOR	0,58	1,15	0,58	0,96	1,15
GMENOR	1,15	0,58	1,15	1,03	0,58
GCRÍTICO(95%)	1,15	1,15	1,15	1,15	1,15
Y MÁXIMO	2,458	3,71	81,51	883	18
Y MÍNIMO	2,453	3,49	80,55	842	16

teor	7,0				
média	2,445	3,25	83,52	698	17
desvio padrão	0,007	0,263	1,145	36,777	0,577
GMAIOR	0,83	1,11	0,83	1,07	1,15
GMENOR	1,11	0,83	1,11	0,91	0,58
GCRÍTICO(95%)	1,15	1,15	1,15	1,15	1,15
Y MÁXIMO	2,451	3,55	84,47	737	18
Y MÍNIMO	2,438	3,04	82,24	664	17

Tabela B7. Identificação de "outliers" - ensaio de resistência à tração (resultados em MPa)

mistura	determinação n°			média	desvio padrão	G _{MAIOR}	G _{MENOR}	G _{CRÍTICO(95%)}	Y _{MÁXIMO}	Y _{MÍNIMO}
	1	2	3							
M1	1,185	1,264	1,390	1,280	0,103	1,07	0,92	1,15	1,390	1,185
M2	0,460	0,523	0,566	0,516	0,053	0,93	1,06	1,15	0,566	0,460
M3	0,524	0,493	0,539	0,519	0,023	0,87	1,09	1,15	0,539	0,493

Tabela B8. Identificação de "outliers" - valores médios de módulo de resiliência na direção 1.

mistura	determinação n° (MPa)				média	desvio padrão	G _{MAIOR}	G _{MENOR}	G _{CRÍTICO(95%)}	Y _{MÁXIMO}	Y _{MÍNIMO}
	1	2	3	4							
M1	5.778	8.072	3.522	5.422	5.699	1.866,675	1,27	1,17	1,46	8.072	3.522
M2*	2.258	2.318	2.428	3.052	2.514	365,510	1,47	0,70	1,46	3.052	2.258
M3	1.540	2.645	1.986	1.371	1.886	568,923	1,33	0,90	1,46	2.645	1.371

mistura	determinação n° (MPa)				média	desvio padrão	G _{MAIOR}	G _{MENOR}	G _{CRÍTICO(95%)}	Y _{MÁXIMO}	Y _{MÍNIMO}
	1	2	3	4							
M1	5.778	8.072	3.522	5.422	5.699	1.866,675	1,27	1,17	1,46	8.072	3.522
M2	2.258	2.318	2.428		2.335	86,217	1,08	0,89	1,15	2.428	2.258
M3	1.540	2.645	1.986	1.371	1.886	568,923	1,33	0,90	1,46	2.645	1.371

Tabela B9. Identificação de "outliers" - valores médios de módulo de resiliência na direção 2.

determinação n° (MPa)					média	desvio padrão	G _{MAIOR}	G _{MEIOR}	G _{CRÍTICO(95%)}	Y _{MÁXIMO}	Y _{MÍNIMO}
mistura	1	2	3	4							
M1	7.375	5.005	6.481	11.684	7.636	2.869,995	1,41	0,92	1,46	11.684	5.005
M2	1.861	1.701	1.798	1.854	1.804	73,921	0,78	1,39	1,46	1.861	1.701
M3*	973	1.247	2.281	1.058	1.390	605,101	1,47	0,69	1,46	2.281	973

determinação n° (MPa)					média	desvio padrão	G _{MAIOR}	G _{MEIOR}	G _{CRÍTICO(95%)}	Y _{MÁXIMO}	Y _{MÍNIMO}
mistura	1	2	3	4							
M1	7.375	5.005	6.481	11.684	7.636	2.869,995	1,41	0,92	1,46	11.684	5.005
M2	1.861	1.701	1.798	1.854	1.787	80,600	0,92	1,06	1,15	1.861	1.701
M3	973	1.247		1.058	1.093	140,251	1,10	0,85	1,46	1.247	973

Tabela B10. Identificação de "outliers" - valores médios de módulo de resiliência entre as direções 1 e 2.

determinação n° (MPa)					média	desvio padrão	G _{MAIOR}	G _{MEIOR}	G _{CRÍTICO(95%)}	Y _{MÁXIMO}	Y _{MÍNIMO}
mistura	1	2	3	4							
M1	6.577	6.539	5.002	8.553	6.668	1.455,301	1,30	1,14	1,46	8.553	5.002
M2*	2.060	2.010	2.113	2.453	2.159	200,461	1,47	0,74	1,46	2.453	2.010
M3	1.257	1.946	2.134	1.215	1.638	470,804	1,05	0,90	1,46	2.134	1.215

determinação n° (MPa)					média	desvio padrão	G _{MAIOR}	G _{MEIOR}	G _{CRÍTICO(95%)}	Y _{MÁXIMO}	Y _{MÍNIMO}
mistura	1	2	3	4							
M1	6.577	6.539	5.002	8.553	6.668	1.455,301	1,30	1,14	1,46	8.553	5.002
M2	2.060	2.010	2.113		2.061	51,507	1,01	0,99	1,15	2.113	2.010
M3	1.257	1.946	2.134	1.215	1.638	470,804	1,05	0,90	1,46	2.134	1.215

Tabela B11. Identificação de "outliers" - ensaio de fluência estática para tensão de 0,4 MPa.

parâmetro:	deformação total (%)										
	determinação n°										
mistura	1	2	3	4	média	desvio padrão	G _{MAIOR}	G _{MEIOR}	G _{CRÍTICO(95%)}	Y _{MÁXIMO}	Y _{MÍNIMO}
M1	0,489	0,487	0,537	0,465	0,495	0,030	1,40	0,97	1,46	0,537	0,465
M2	0,475	0,411	0,444	0,400	0,433	0,034	1,25	0,96	1,46	0,475	0,400
M3	0,475	0,508	0,457		0,480	0,026	1,08	0,89	1,15	0,508	0,457

parâmetro:	deformação recuperável (%)										
	determinação n°										
mistura	1	2	3	4	média	desvio padrão	G _{MAIOR}	G _{MEIOR}	G _{CRÍTICO(95%)}	Y _{MÁXIMO}	Y _{MÍNIMO}
M1	0,261	0,292	0,276	0,289	0,280	0,014	0,88	1,31	1,46	0,292	0,261
M2	0,285	0,300	0,301	0,272	0,290	0,014	0,84	1,27	1,46	0,301	0,272
M3	0,301	0,317	0,331		0,316	0,015	0,98	1,02	1,15	0,331	0,301

parâmetro:	deformação não recuperável (%)										
	determinação n°										
mistura	1	2	3	4	média	desvio padrão	G _{MAIOR}	G _{MEIOR}	G _{CRÍTICO(95%)}	Y _{MÁXIMO}	Y _{MÍNIMO}
M1	0,228	0,195	0,260	0,177	0,215	0,037	1,23	1,04	1,46	0,260	0,177
M2	0,190	0,111	0,143	0,128	0,143	0,034	1,38	0,94	1,46	0,190	0,111
M3	0,174	0,190	0,126		0,163	0,033	0,80	1,12	1,15	0,190	0,126

parâmetro:	recuperação (%)										
	determinação n°										
mistura	1	2	3	4	média	desvio padrão	G _{MAIOR}	G _{MEIOR}	G _{CRÍTICO(95%)}	Y _{MÁXIMO}	Y _{MÍNIMO}
M1	53,33	60,00	51,52	62,07	56,730	5,096	1,05	1,02	1,46	62,070	51,520
M2	60,00	73,08	67,86	68,00	67,235	5,400	1,08	1,34	1,46	73,080	60,000
M3	63,33	62,50	72,41		66,080	5,498	1,15	0,65	1,15	72,410	62,500

Tabela B11. Identificação de "outliers" - ensaio de fluência estática para tensão de 0,4 MPa. (cont.)

parâmetro:	módulo de fluência - 3 600 s				determinação n°						
mistura	1	2	3	4	média	desvio padrão	G _{MAIOR}	G _{MENOR}	G _{CRÍTICO(95%)}	Y _{MÁXIMO}	Y _{MÍNIMO}
M1	81,73	82,13	74,55	85,93	81,085	4,750	1,02	1,38	1,46	85,930	74,550
M2	84,13	97,38	90,14	100,00	92,913	7,188	0,99	1,22	1,46	100,000	84,130
M3	84,27	78,75	87,45		83,490	4,402	0,90	1,08	1,15	87,450	78,750

parâmetro:	módulo de fluência - 4 500 s				determinação n°						
mistura	1	2	3	4	média	desvio padrão	G _{MAIOR}	G _{MENOR}	G _{CRÍTICO(95%)}	Y _{MÁXIMO}	Y _{MÍNIMO}
M1	175,14	205,33	153,75	226,55	190,193	32,175	1,13	1,13	1,46	226,550	153,750
M2	210,33	361,71	280,44	312,50	291,245	63,459	1,11	1,28	1,46	361,710	210,330
M3	229,82	210,00	317,00		252,273	56,924	1,14	0,74	1,15	317,000	210,000

parâmetro:	inclinação do trecho reto				determinação n°						
mistura	1	2	3	4	média	desvio padrão	G _{MAIOR}	G _{MENOR}	G _{CRÍTICO(95%)}	Y _{MÁXIMO}	Y _{MÍNIMO}
M1*	0,033	0,032	0,049	0,032	0,037	0,008	1,50	0,54	1,46	0,049	0,032
M2*	0,016	0,016	0,016	0,000	0,016	0,000	-	-	1,15	0,016	0,016
M3*	0,000	0,016	0,000		0,016	-	-	-	-	0,016	0,016

parâmetro:	inclinação do trecho reto				determinação n°						
mistura	1	2	3	4	média	desvio padrão	G _{MAIOR}	G _{MENOR}	G _{CRÍTICO(95%)}	Y _{MÁXIMO}	Y _{MÍNIMO}
M1*	0,033	0,032		0,032	0,032	0,001	1,15	0,58	1,15	0,033	0,032
M2*	0,016	0,016	0,016		0,016	0,000	-	-	1,15	0,016	0,016
M3*		0,016			0,016	-	-	-	-	0,016	0,016

Tabela B12. Identificação de "outliers" - ensaio de fluência estática para tensão de 0,7 MPa.

parâmetro:	deformação total (%)										
	determinação n°										
mistura	1	2	3	4	média	desvio padrão	G _{MAIOR}	G _{MENOR}	G _{CRÍTICO(95%)}	Y _{MÁXIMO}	Y _{MÍNIMO}
M1*	0,813	0,647	0,648	0,617	0,681	0,089	1,48	0,72	1,46	0,813	0,617
M2	0,721	0,835	0,895	0,816	0,817	0,072	1,08	1,33	1,46	0,895	0,721
M3	0,711	0,806	0,659		0,725	0,075	1,08	0,89	1,15	0,806	0,659

parâmetro:	deformação total (%)										
	determinação n°										
mistura	1	2	3	4	média	desvio padrão	G _{MAIOR}	G _{MENOR}	G _{CRÍTICO(95%)}	Y _{MÁXIMO}	Y _{MÍNIMO}
M1*		0,647	0,648	0,617	0,637	0,018	0,61	1,15	1,15	0,648	0,617
M2	0,721	0,835	0,895	0,816	0,817	0,072	1,08	1,33	1,46	0,895	0,721
M3	0,711	0,806	0,659		0,725	0,075	1,08	0,89	1,15	0,806	0,659

parâmetro:	deformação recuperável (%)										
	determinação n°										
mistura	1	2	3	4	média	desvio padrão	G _{MAIOR}	G _{MENOR}	G _{CRÍTICO(95%)}	Y _{MÁXIMO}	Y _{MÍNIMO}
M1	M1	0,407	0,437	0,405	0,422	0,418	0,015	1,29	0,86	1,46	0,437
M2	M2	0,465	0,449	0,415	0,432	0,440	0,022	1,15	1,17	1,46	0,465
M3	M3	0,458	0,521	0,487		0,489	0,032	1,03	0,97	1,15	0,521

parâmetro:	deformação não recuperável (%)										
	determinação n°										
mistura	1	2	3	4	média	desvio padrão	G _{MAIOR}	G _{MENOR}	G _{CRÍTICO(95%)}	Y _{MÁXIMO}	Y _{MÍNIMO}
M1*	0,407	0,210	0,243	0,195	0,264	0,098	1,47	0,70	1,46	0,407	0,195
M2	0,256	0,385	0,479	0,384	0,376	0,092	1,12	1,31	1,46	0,479	0,256
M3	0,253	0,284	0,173		0,237	0,057	0,83	1,11	1,15	0,284	0,173

Tabela B12. Identificação de "outliers" - ensaio de fluência estática para tensão de 0,7 MPa. (cont.)

parâmetro:	deformação não recuperável (%)											
	determinação n°											
mistura	1	2	3	4	média	desvio padrão	G _{MAIOR}	G _{MENOR}	G _{CRÍTICO(95%)}	Y _{MÁXIMO}	Y _{MÍNIMO}	
M1*		0,210	0,243	0,195	0,216	0,025	1,10	0,86	1,15	0,243	0,195	
M2	0,256	0,385	0,479	0,384	0,376	0,092	1,12	1,31	1,46	0,479	0,256	
M3	0,253	0,284	0,173		0,237	0,057	0,83	1,11	1,15	0,284	0,173	

parâmetro:	recuperação											
	determinação n°											
mistura	1	2	3	4	média	desvio padrão	G _{MAIOR}	G _{MENOR}	G _{CRÍTICO(95%)}	Y _{MÁXIMO}	Y _{MÍNIMO}	
M1	50,00	67,50	62,50	68,42	62,105	8,479	0,74	1,43	1,46	68,420	50,000	
M2	64,44	53,85	46,43	52,94	54,415	7,456	1,34	1,07	1,46	64,440	46,430	
M3	64,44	64,71	73,81		67,653	5,334	1,15	0,60	1,15	73,810	64,440	

parâmetro:	módulo de fluência - 3 600 s											
	determinação n°											
mistura	1	2	3	4	média	desvio padrão	G _{MAIOR}	G _{MENOR}	G _{CRÍTICO(95%)}	Y _{MÁXIMO}	Y _{MÍNIMO}	
M1*	86,10	108,15	107,98	113,47	103,925	12,154	0,79	1,47	1,46	113,470	86,100	
M2	97,07	83,87	78,25	85,78	86,243	7,894	1,37	1,01	1,46	97,070	78,250	
M3	98,47	86,88	106,17		97,173	9,710	0,93	1,06	1,15	106,170	86,880	

parâmetro:	módulo de fluência - 3 600 s											
	determinação n°											
mistura	1	2	3	4	média	desvio padrão	G _{MAIOR}	G _{MENOR}	G _{CRÍTICO(95%)}	Y _{MÁXIMO}	Y _{MÍNIMO}	
M1*		108,15	107,98	113,47	109,867	3,122	1,15	0,60	1,15	113,470	107,980	
M2	97,07	83,87	78,25	85,78	86,243	7,894	1,37	1,01	1,46	97,070	78,250	
M3	98,47	86,88	106,17		97,173	9,710	0,93	1,06	1,15	106,170	86,880	

Tabela B12. Identificação de "outliers" - ensaio de fluência estática para tensão de 0,7 MPa. (cont.)

parâmetro:	módulo de fluência - 4 500 s										
	determinação n°										
mistura	1	2	3	4	média	desvio padrão	G _{MAIOR}	G _{MENOR}	G _{CRÍTICO(95%)}	Y _{MÁXIMO}	Y _{MÍNIMO}
M1	172,20	332,77	287,93	359,33	288,058	82,668	0,86	1,40	1,46	359,330	172,200
M2	273,00	181,71	146,07	182,29	195,768	54,203	1,42	0,92	1,46	273,000	146,070
M3	276,94	246,17	405,36		309,490	84,439	1,14	0,75	1,15	405,360	246,170

parâmetro:	inclinação do trecho reto										
	determinação n°										
mistura	1	2	3	4	média	desvio padrão	G _{MAIOR}	G _{MENOR}	G _{CRÍTICO(95%)}	Y _{MÁXIMO}	Y _{MÍNIMO}
M1*	0,033	0,032	0,032	0,016	0,028	0,008	0,58	1,50	1,46	0,033	0,016
M2	0,048	0,064	0,016	0,016	0,036	0,024	1,17	0,83	1,46	0,064	0,016
M3	0,047	0,047	0,031		0,042	0,009	0,58	1,15	1,15	0,047	0,031

parâmetro:	inclinação do trecho reto										
	determinação n°										
mistura	1	2	3	4	média	desvio padrão	G _{MAIOR}	G _{MENOR}	G _{CRÍTICO(95%)}	Y _{MÁXIMO}	Y _{MÍNIMO}
M1*	0,033	0,032	0,032		0,032	0,001	1,15	0,58	1,15	0,033	0,032
M2	0,048	0,064	0,016	0,016	0,036	0,024	1,17	0,83	1,46	0,064	0,016
M3	0,047	0,047	0,031		0,042	0,009	0,58	1,15	1,15	0,047	0,031

ANEXO C

Resultados de repetibilidade dos ensaios de dosagem Marshall, resistência à tração por compressão diametral simples, módulo de resiliência por compressão diametral com carga repetida e fluência por compressão uniaxial estática.

Tabela C1. Variação dos resultados dos parâmetros Marshall para a mistura M1.

teor (%)	4,5								
parâmetros	det 1	det 2	det 3	média (m)	dp (s)	cv (%)	diferenças entre determinações		
D _a	2,488	2,443	2,456	2,462	0,023	0,941	0,045	0,032	0,013
V _v (%)	4,97	6,68	6,22	5,96	0,885	14,855	1,71	1,25	0,46
RBV (%)	69,17	62,10	63,89	65,05	3,676	5,650	7,07	5,28	1,79
EM (kgf)	1,448	1,320	1,424	1,397	68,039	4,869	128	24	104
FM (0,01")	12	13	12	12	0,577	4,681	1	0	1

teor (%)	5,0								
parâmetros	det 1	det 2	det 3	média (m)	dp (s)	cv (%)	diferenças entre determinações		
D _a	2,479	2,474	2,476	2,476	0,003	0,102	0,005	0,003	0,002
V _v (%)	4,51	4,73	4,64	4,63	0,111	2,391	0,22	0,13	0,09
RBV (%)	73,26	72,25	72,67	72,73	0,507	0,698	1,01	0,59	0,42
EM (kgf)	1,121	1,041	1,202	1,121	80,501	7,179	80	81	161
FM (0,01")	14	13	15	14	1,000	7,143	1	1	2

teor (%)	5,5								
parâmetros	det 1	det 2	det 3	média (m)	dp (s)	cv (%)	diferenças entre determinações		
D _a	2,498	2,473	2,491	2,487	0,013	0,519	0,025	0,007	0,018
V _v (%)	2,97	3,94	3,27	3,39	0,497	14,635	0,97	0,30	0,67
RBV (%)	82,15	77,46	80,68	80,10	2,399	2,995	4,69	1,47	3,22
EM (kgf)	1,197	1,013	1,074	1,094,7	93,725	8,562	184	123	61
FM (0,01")	14	15	16	15,0	1,000	6,667	1	2	1

teor (%)	6,0								
parâmetros	det 1	det 2	det 3	média (m)	dp (s)	cv (%)	diferenças entre determinações		
D _a	2,478	2,501	2,506	2,495	0,015	0,599	0,023	0,028	0,005
V _v (%)	2,96	2,07	1,89	2,31	0,573	24,837	0,89	1,07	0,18
RBV (%)	83,33	87,86	88,81	86,67	2,928	3,379	4,53	5,48	0,95
EM (kgf)	890	1,076	977	981,0	93,064	9,487	186	87	99
FM (0,01")	20	17	18	18,3	1,528	8,332	3	2	1

teor (%)	6,5								
parâmetros	det 1	det 2	det 3	média (m)	dp (s)	cv (%)	diferenças entre determinações		
D _a	2,482	2,485	2,478	2,482	0,004	0,142	0,003	0,004	0,007
V _v (%)	2,00	1,88	2,16	2,01	0,140	6,977	0,12	0,16	0,28
RBV (%)	88,91	89,54	88,14	88,86	0,701	0,789	0,63	0,77	1,40
EM (kgf)	838	861	856	851,7	12,097	1,420	23	18	5
FM (0,01")	18	18	18	18,0	0,000	0,000	0	0	0

Tabela C2. Variação dos resultados dos parâmetros Marshall para a mistura M2.

teor (%)	5.0								
parâmetros	det 1	det 2	det 3	média (m)	dp (s)	cv (%)	diferenças entre determinações		
D _a	2,486	2,469	2,440	2,465	0,023	0,944	0,017	0,046	0,029
V _v (%)	4,59	5,27	6,37	5,41	0,898	16,603	0,68	1,78	1,10
RBV (%)	72,38	69,41	64,98	68,92	3,724	5,403	2,97	7,40	4,43
EM (kgf)	1.301	1.093	804	1066	249,598	23,414	208,00	497,00	289,00
FM (0,01")	13	12	13	13	0,577	4,558	1	0	1

teor (%)	5.5								
parâmetros	det 1	det 2	det 3	média (m)	dp (s)	cv (%)	diferenças entre determinações		
D _a	2,487	2,459	2,460	2,469	0,016	0,643	0,028	0,027	0,001
V _v (%)	3,80	4,89	4,86	4,52	0,621	13,745	1,09	1,06	0,03
RBV (%)	77,72	72,82	72,93	74,49	2,798	3,756	4,90	4,79	0,11
EM (kgf)		842	918	880	53,740	6,107			76,00
FM (0,01")	13	14	14	14	0,577	4,225	1	1	0

teor (%)	6.0								
parâmetros	det 1	det 2	det 3	média (m)	dp (s)	cv (%)	diferenças entre determinações		
D _a	2,466	2,465		2,466	0,001	0,029	0,001		
V _v (%)	3,85	3,90		3,88	0,035	0,912	0,05		
RBV (%)	78,84	78,60	77,24	78,23	0,863	1,103	0,24	1,60	1,36
EM (kgf)	804	828		816	16,971	2,080	24,00		
FM (0,01")	14	15	15	15	0,577	3,936	1	1	0

teor (%)	6.5								
parâmetros	det 1	det 2	det 3	média (m)	dp (s)	cv (%)	diferenças entre determinações		
D _a		2,459	2,455	2,457	0,003	0,115			0,004
V _v (%)		3,35	3,51	3,43	0,113	3,298			0,16
RBV (%)		82,19	81,48	81,84	0,502	0,613			0,71
EM (kgf)	681	738	655	691	42,454	6,141	57,00	26,00	83,00
FM (0,01")	16	15	15	15	0,577	3,765	1	1	0

teor (%)	7.0								
parâmetros	det 1	det 2	det 3	média (m)	dp (s)	cv (%)	diferenças entre determinações		
D _a	2,443	2,400	2,432	2,425	0,022	0,921	0,043	0,011	0,032
V _v (%)	3,26	4,97	3,69	3,97	0,890	22,387	1,71	0,43	1,28
RBV (%)	83,57	76,59	81,73	80,63	3,618	4,487	6,98	1,84	5,14
EM (kgf)	596	389	501	495	103,616	20,918	207,00	95,00	112,00
FM (0,01")	18	18	19	18	0,577	3,149	0	1	1

Tabela C3. Variação dos resultados dos parâmetros Marshall para a mistura M3.

teor (%)	5,0								
parâmetros	det 1	det 2	det 3	média (m)	dp (s)	cv (%)	diferenças entre determinações		
D _a	2,420	2,403	2,415	2,413	0,009	0,362	0,017	0,005	0,012
V _v (%)	7,22	7,87	7,41	7,50	0,334	4,456	0,65	0,19	0,46
RBV (%)	61,73	59,50	61,06	60,76	1,144	1,883	2,23	0,67	1,56
EM (kgf)	956	974	883	938	48,191	5,139	18,00	73,00	91,00
FM (0,01")	16	13	13	14	1,732	12,372	3	3	0

teor (%)	5,5								
parâmetros	det 1	det 2	det 3	média (m)	dp (s)	cv (%)	diferenças entre determinações		
D _a		2,427	2,433	2,430	0,004	0,175			0,006
V _v (%)		6,18	5,98	6,08	0,141	2,326			0,20
RBV (%)		67,53	68,28	67,91	0,530	0,781			0,75
EM (kgf)		842	918	880	53,740	6,107			76,00
FM (0,01")		15	13	14	1,414	10,102			2

teor (%)	6,0								
parâmetros	det 1	det 2	det 3	média (m)	dp (s)	cv (%)	diferenças entre determinações		
D _a	2,445	2,452	2,442	2,446	0,005	0,210	0,007	0,003	0,010
V _v (%)	4,77	4,48	4,87	4,71	0,203	4,304	0,29	0,10	0,39
RBV (%)	74,75	75,95	74,33	75,01	0,841	1,121	1,20	0,42	1,62
EM (kgf)	901	946	837	895	54,775	6,122	45,00	64,00	109,00
FM (0,01")	15	14	18	16	2,082	13,287	1	3	4

teor (%)	6,5								
parâmetros	det 1	det 2	det 3	média (m)	dp (s)	cv (%)	diferenças entre determinações		
D _a	2,458	2,458		2,458	0,000	0,003	0,000		
V _v (%)	3,49	3,49		3,49	0,000	0,000	0,00		
RBV (%)	81,51	81,51		81,51	0,000	0,000	0,00		
EM (kgf)	883	842	865	863	20,551	2,380	41,00	18,00	23,00
FM (0,01")	16	16		16	0,000	0,000	0		

teor (%)	7,0								
parâmetros	det 1	det 2	det 3	média (m)	dp (s)	cv (%)	diferenças entre determinações		
D _a	2,451	2,438	2,447	2,445	0,007	0,272	0,013	0,004	0,009
V _v (%)	3,04	3,55	3,18	3,26	0,264	8,091	0,51	0,14	0,37
RBV (%)	84,47	82,24	83,83	83,51	1,148	1,375	2,23	0,64	1,59
EM (kgf)	737	962	664	788	155,327	19,720	225,00	73,00	298,00
FM (0,01")		17	17	17	0,000	0,000			0

Tabela C4. Equações de repetibilidade em função da média "m" dos valores dos parâmetros de dosagem Marshall, para os três modelos recomendados pela ISO 5725-2/94, para nível de confiança de 95%.

densidade aparente					Eq. I	Equação II										Equação III						
mistura	teor	média	dp (s)	r	r/m	W ₀	m.W ₀	m ² .W ₀	r.W ₀	r.m.W ₀	W ₁	m.W ₁	m ² .W ₁	r.W ₁	r.m.W ₁	log m	(log m) ²	log r	log m . log r			
M1	4,5	2,462	0,023	0,065	0,026	238	586	1.442	15	38	0,0043	0,0106	0,0260	0,0003	0,0007	0,3913	0,1532	-1,1881	-0,465			
	5,0	2,476	0,003	0,007	0,003	20.140	49.872	123.501	142	351	0,0020	0,0049	0,0122	0,0000	0,0000	0,3938	0,1551	-2,1520	-0,847			
	5,5	2,487	0,013	0,036	0,015	767	1.907	4.744	28	69	0,0002	0,0004	0,0011	0,0000	0,0000	0,3957	0,1566	-1,4424	-0,571			
	6,0	2,495	0,015	0,042	0,017	572	1.427	3.561	24	60	-0,0011	-0,0027	-0,0068	0,0000	-0,0001	0,3971	0,1577	-1,3787	-0,547			
	6,5	2,482	0,004	0,010	0,004	10.342	25.665	63.693	102	252	0,0011	0,0027	0,0068	0,0000	0,0000	0,3947	0,1558	-2,0073	-0,792			
M2	5,0	2,465	0,023	0,065	0,026	236	581	1.433	15	38	0,0039	0,0095	0,0234	0,0003	0,0006	0,3918	0,1535	-1,1862	-0,465			
	5,5	2,469	0,016	0,044	0,018	505	1.248	3.081	22	56	0,0032	0,0080	0,0198	0,0001	0,0004	0,3925	0,1540	-1,3519	-0,531			
	6,0	2,466	0,001	0,002	0,001	255.102	628.954	1.550.686	505	1.245	0,0038	0,0093	0,0229	0,0000	0,0000	0,3919	0,1536	-2,7034	-1,059			
	6,5	2,457	0,003	0,008	0,003	15.944	39.174	96.251	126	310	0,0052	0,0127	0,0312	0,0000	0,0001	0,3904	0,1524	-2,1013	-0,820			
	7,0	2,425	0,022	0,063	0,026	256	620	1.503	16	39	0,0104	0,0253	0,0614	0,0007	0,0016	0,3847	0,1480	-1,2038	-0,463			
M3	5,0	2,413	0,009	0,024	0,010	1.671	4.032	9.727	41	99	0,0125	0,0301	0,0726	0,0003	0,0007	0,3825	0,1463	-1,6115	-0,616			
	5,5	2,430	0,004	0,012	0,005	7.086	17.219	41.843	84	205	0,0096	0,0234	0,0568	0,0001	0,0003	0,3856	0,1487	-1,9252	-0,742			
	6,0	2,446	0,005	0,014	0,006	4.844	11.849	28.987	70	170	0,0069	0,0169	0,0414	0,0001	0,0002	0,3885	0,1509	-1,8426	-0,716			
	6,5	2,458	0,000	0,000	0,000						0,0050	0,0123	0,0302	0,0000	0,0000	0,3906	0,1526	-3,7034	-1,446			
	7,0	2,445	0,007	0,019	0,008	2.877	7.035	17.204	54	131	0,0071	0,0173	0,0424	0,0001	0,0003	0,3883	0,1508	-1,7295	-0,672			
				Σ	0,167	320.579	790.171	1.947.655	1.244	3.063	0,074	0,1808	0,4414	0,0020	0,005	5,8596	2,2892	-27,5272	-10,754			
					0,011	(T ₁)	(T ₂)	(T ₃)	(T ₄)	(T ₅)	(T ₁)	(T ₂)	(T ₃)	(T ₄)	(T ₅)	(T ₁)	(T ₂)	(T ₃)	(T ₄)			
				(b)						a ₁	0,410						a ₂	0,451	c		-0,266	
										b ₁	-0,165						b ₂	-0,174	d		90.502	
																				q		15

Tabela C4. Equações de repetibilidade em função da média "m" dos valores dos parâmetros de dosagem Marshall, para os três modelos recomendados pela ISO 5725-2/94, para nível de confiança de 95%. (cont.)

volume de vazios					Eq. I	Equação II										Equação III						
mistura	teor	média	dp (s)	r	r/m	W ₀	m.W ₀	m ² .W ₀	r.W ₀	r.m.W ₀	W ₁	m.W ₁	m ² .W ₁	r.W ₁	r.m.W ₁	log m	(log m) ²	log r	log m . log r			
M1	4,5	5,957	0,885	2,478	0,416	0,163	0,970	5,780	0,404	2,404	0,318	1,895	11,290	0,788	4,696	0,775	0,601	0,394	0,305			
	5,0	4,627	0,111	0,310	0,067	10,427	48,240	223,190	3,229	14,940	0,241	1,115	5,157	0,075	0,345	0,665	0,443	-0,509	-0,339			
	5,5	3,393	0,497	1,391	0,410	0,517	1,755	5,955	0,719	2,440	0,169	0,574	1,949	0,235	0,799	0,531	0,282	0,143	0,076			
	6,0	2,307	0,573	1,604	0,695	0,389	0,896	2,068	0,623	1,438	0,106	0,245	0,565	0,170	0,393	0,363	0,132	0,205	0,075			
	6,5	2,013	0,140	0,393	0,195	6,464	13,014	26,201	2,542	5,119	0,089	0,179	0,361	0,035	0,071	0,304	0,092	-0,405	-0,123			
M2	5,0	5,410	0,898	2,515	0,465	0,158	0,855	4,627	0,398	2,151	0,286	1,550	8,384	0,720	3,897	0,733	0,538	0,401	0,294			
	5,5	4,517	0,621	1,738	0,385	0,331	1,495	6,751	0,575	2,598	0,235	1,059	4,785	0,408	1,842	0,655	0,429	0,240	0,157			
	6,0	3,875	0,035	0,099	0,026	102,041	395,408	1.532,207	10,102	39,143	0,197	0,764	2,962	0,020	0,076	0,588	0,346	-1,004	-0,591			
	6,5	3,430	0,113	0,317	0,092	9,965	34,180	117,236	3,157	10,828	0,171	0,588	2,017	0,054	0,186	0,535	0,287	-0,499	-0,267			
	7,0	3,973	0,890	2,491	0,627	0,161	0,641	2,545	0,402	1,595	0,203	0,807	3,205	0,506	2,009	0,599	0,359	0,396	0,237			
M3	5,0	7,500	0,334	0,936	0,125	1,142	8,564	64,232	1,069	8,015	0,408	3,059	22,942	0,382	2,863	0,875	0,766	-0,029	-0,025			
	5,5	6,080	0,141	0,396	0,065	6,378	38,776	235,755	2,525	15,354	0,325	1,978	12,028	0,129	0,783	0,784	0,615	-0,402	-0,315			
	6,0	4,707	0,203	0,567	0,121	3,108	14,631	68,861	1,763	8,298	0,246	1,156	5,440	0,139	0,656	0,673	0,453	-0,246	-0,166			
	6,5	3,490	0,000	0,000	0,000						0,175	0,610	2,130	0,000	0,000	0,543	0,295					
	7,0	3,257	0,264	0,738	0,227	1,837	5,983	19,483	1,355	4,414	0,161	0,525	1,711	0,119	0,388	0,513	0,263	-0,132	-0,068			
				Σ	3,915	143,080	565,407	2.314,892	28,863	118,737	3,331	16,106	84,927	3,780	19,002	9,136	5,897	-1,448	-0,750			
					0,261	(T ₁)	(T ₂)	(T ₃)	(T ₄)	(T ₅)	(T ₁)	(T ₂)	(T ₃)	(T ₄)	(T ₅)	(T ₁)	(T ₂)	(T ₃)	(T ₄)			
				(b)						a ₁	-0,028						a ₂	0,637			c	-0,338
										b ₁	0,058						b ₂	0,103			d	4,899
																				q	15	

Tabela C4. Equações de repetibilidade em função da média "m" dos valores dos parâmetros de dosagem Marshall, para os três modelos recomendados pela ISO 5725-2/94, para nível de confiança de 95%. (cont.)

estabilidade Marshall					Eq. I	Equação II										Equação III			
mistura	teor	média	dp (s)	r	r/m	W ₀	m.W ₀	m ² .W ₀	r.W ₀	r.m.W ₀	W ₁	m.W ₁	m ² .W ₁	r.W ₁	r.m.W ₁	log m	(log m) ²	log r	log m . log r
M1	4,5	1.397	68,039	190,51	0,136	0,00003	0,039	53,798	0,005	7,335	183,668	256,646	358,619,475	34,991	48.893,498	3,145	9,893	2,280	7,171
	5,0	1.121	80,501	225,40	0,201	0,00002	0,022	24,749	0,004	4,975	123,279	138,237	155,009,505	27,787	31.158,770	3,050	9,301	2,353	7,176
	5,5	1.095	93,725	262,43	0,240	0,00001	0,016	17,400	0,004	4,171	117,444	128,562	140,732,842	30,821	33.738,518	3,039	9,237	2,419	7,352
	6,0	981	93,064	260,58	0,266	0,00001	0,014	14,173	0,004	3,765	92,574	90,815	89,089,406	24,123	23.664,597	2,992	8,950	2,416	7,228
	6,5	852	12,097	33,87	0,040	0,00087	0,742	632,237	0,030	25,144	64,275	54,741	46,621,316	2,177	1.854,149	2,930	8,586	1,530	4,483
M2	5,0	1.066	249,598	698,87	0,656	0,00000	0,002	2,327	0,001	1,525	111,172	118,509	126,330,875	77,695	82.822,983	3,028	9,167	2,844	8,612
	5,5	880	53,740	150,47	0,171	0,00004	0,039	34,202	0,007	5,848	70,475	62,018	54,575,717	10,605	9.331,971	2,944	8,670	2,177	6,411
	6,0	816	16,971	47,52	0,058	0,00044	0,361	294,898	0,021	17,173	56,472	46,081	37,601,918	2,683	2.189,647	2,912	8,478	1,677	4,882
	6,5	691	42,454	118,87	0,172	0,00007	0,049	33,824	0,008	5,816	29,194	20,183	13,953,173	3,470	2.399,170	2,840	8,064	2,075	5,893
	7,0	495	103,616	290,13	0,586	0,00001	0,006	2,915	0,003	1,707	-13,691	-6,782	-3,359,107	-3,972	-1,967,489	2,695	7,262	2,463	6,636
M3	5,0	938	48,191	134,93	0,144	0,00005	0,052	48,290	0,007	6,949	83,092	77,913	73,056,392	11,212	10.513,082	2,972	8,833	2,130	6,331
	5,5	880	53,740	150,47	0,171	0,00004	0,039	34,202	0,007	5,848	70,475	62,018	54,575,717	10,605	9.331,971	2,944	8,670	2,177	6,411
	6,0	895	54,775	153,37	0,171	0,00004	0,038	34,028	0,007	5,833	73,684	65,923	58,978,713	11,301	10.110,597	2,952	8,712	2,186	6,452
	6,5	863	20,551	57,54	0,067	0,00030	0,261	225,105	0,017	15,004	66,828	57,695	49,809,990	3,845	3.319,890	2,936	8,621	1,760	5,168
	7,0	788	155,327	434,91	0,552	0,00001	0,004	3,280	0,002	1,811	50,272	39,598	31,189,799	21,864	17.221,612	2,896	8,389	2,638	7,642
Σ					3,630	0,00197	1,684	1,455	0,128	112,9	1.179,2	1.212,156	1.286,785,729	269,207	284.582,966	44,275	130,834	33,126	97,848
					0,242	(T ₁)	(T ₂)	(T ₃)	(T ₄)	(T ₅)	(T ₁)	(T ₂)	(T ₃)	(T ₄)	(T ₅)	(T ₁)	(T ₂)	(T ₃)	(T ₄)
					(b)					a ₁	-122,07					a ₂	30,217	c	0,786
										b ₁	0,219					b ₂	0,193	d	-1,335,12
																		q	15

Tabela C4. Equações de repetibilidade em função da média "m" dos valores dos parâmetros de dosagem Marshall, para os três modelos recomendados pela ISO 5725-2/94, para nível de confiança de 95%. (cont.)

fluência Marshall					Eq. I	Equação II										Equação III				
mistura	teor	média	dp (s)	r	r/m	W ₀	m.W ₀	m².W ₀	r.W ₀	r.m.W ₀	W ₁	m.W ₁	m².W ₁	r.W ₁	r.m.W ₁	log m	(log m)²	log r	log m . log r	
M1	4,5	4,5	12,333	0,577	1,617	0,131	0,383	4,719	58,206	0,619	7,629	1,820	22,445	276,826	2,942	36,285	1,091	1,190	0,209	
	5,0	5,0	14,000	1,000	2,800	0,200	0,128	1,786	25,000	0,357	5,000	1,902	26,624	372,730	5,325	74,546	1,146	1,314	0,447	
	5,5	5,5	15,000	1,000	2,800	0,187	0,128	1,913	28,699	0,357	5,357	1,951	29,261	438,921	5,462	81,932	1,176	1,383	0,447	
	6,0	6,0	18,333	1,528	4,277	0,233	0,055	1,002	18,373	0,234	4,286	2,114	38,763	710,653	9,043	165,792	1,263	1,596	0,631	
	6,5	6,5	18,000	0,000	0,000						2,098	37,764	679,746	0,000	0,000	1,255	1,576			
M2	5,0	5,0	12,667	0,577	1,617	0,128	0,383	4,847	61,395	0,619	7,835	1,836	23,259	294,616	2,968	37,600	1,103	1,216	0,209	
	5,5	5,5	13,667	0,577	1,617	0,118	0,383	5,230	71,471	0,619	8,454	1,885	25,766	352,137	3,048	41,653	1,136	1,290	0,209	
	6,0	6,0	14,667	0,577	1,617	0,110	0,383	5,612	82,313	0,619	9,073	1,934	28,371	416,111	3,127	45,864	1,166	1,360	0,209	
	6,5	6,5	15,333	0,577	1,617	0,105	0,383	5,867	89,966	0,619	9,485	1,967	30,162	462,491	3,180	48,760	1,186	1,406	0,209	
	7,0	7,0	18,333	0,577	1,617	0,088	0,383	7,015	128,614	0,619	11,341	2,114	38,763	710,653	3,418	62,663	1,263	1,596	0,209	
M3	5,0	5,0	14,000	1,732	4,850	0,346	0,043	0,595	8,333	0,206	2,887	1,902	26,624	372,730	9,223	129,118	1,146	1,314	0,686	
	5,5	5,5	14,000	1,414	3,960	0,283	0,064	0,893	12,500	0,253	3,536	1,902	26,624	372,730	7,530	105,424	1,146	1,314	0,598	
	6,0	6,0	15,667	2,082	5,829	0,372	0,029	0,461	7,225	0,172	2,688	1,983	31,074	486,833	11,561	181,123	1,195	1,428	0,766	
	6,5	6,5	16,000	0,000	0,000						2,000	31,997	511,957	0,000	0,000	1,204	1,450			
	7,0	7,0	17,000	0,000	0,000						2,049	34,831	592,134	0,000	0,000	1,230	1,514			
Σ					2,302	2,741412	39,941	592,095	5,290	77,571	29,458	452,329	7.051,3	66,827	1.010,8	17,707	20,945	4,826	5,670	
					0,153	(T ₁)	(T ₂)	(T ₃)	(T ₄)	(T ₅)	(T ₁)	(T ₂)	(T ₃)	(T ₄)	(T ₅)	(T ₁)	(T ₂)	(T ₃)	(T ₄)	
					(b)				a ₁	1,215				a ₂	4,505				c	1,071
									b ₁	0,049				b ₂	-0,146				d	-268,08
																		q	15	

Tabela C5. Equações da repetibilidade "r" em função da média "m" dos resultados das dosagens Marshall, para os três modelos sugeridos pela ISO 5725-2/94, com nível de confiança de 95%.

modelo	densidade aparente	volume de vazios	relação betume-vazios	estabilidade Marshall	fluência Marshall
$r = b.m$	$r = 0,011.m$	$r = 0,261.m$	$r = 0,064.m$	$r = 0,242.m$	$r = 0,153.m$
$r = a + b.m$	$r = 0,451 - 0,174.m$	$r = 0,637 + 0,103.m$	$r = 10,599 - 0,077.m$	$r = -30,217 + 0,193.m$	$r = 4,505 - 0,146.m$
$r = c.m^d$	$d > 1$	$d > 1$	$r = 2,627.m^{-0,978}$	$r = 0,786.m^{-1,335}$	$r = 1,071.m^{-2,68}$

Tabela C6. Valores de repetibilidade "r" para as dosagens Marshall, de acordo com os modelos da ISO 5725-2/94, para nível de confiança de 95%.

mistura	teor	densidade aparente			volume de vazios			relação betume-vazios			estabilidade Marshall			fluência Marshall		
		$r = b.m$	$r = a + b.m$	$r = c.m^d$	$r = b.m$	$r = a + b.m$	$r = c.m^d$	$r = b.m$	$r = a + b.m$	$r = c.m^d$	$r = b.m$	$r = a + b.m$	$r = c.m^d$	$r = b.m$	$r = a + b.m$	$r = c.m^d$
M1	4,5	0,027	0,024	não	1,555	1,250	não	4,133	5,609	0,000	338,16	299,474	0,000	1,89	2,709	0,000
	5,0	0,028	0,021		1,208	1,113		4,620	5,020	0,000	271,37	246,291	0,000	2,15	2,466	0,000
	5,5	0,028	0,019		0,886	0,986		5,088	4,455	0,000	264,92	241,152	0,000	2,30	2,320	0,000
	6,0	0,028	0,018		0,602	0,874		5,506	3,951	0,000	237,41	219,249	0,000	2,81	1,835	0,000
	6,5	0,028	0,020		0,525	0,844		5,645	3,782	0,000	206,11	194,328	0,000	2,76	1,883	0,000
M2	5,0	0,027	0,023	disponível	1,412	1,194	disponível	4,379	5,312	0,000	257,98	235,628	0,000	1,94	2,660	0,000
	5,5	0,028	0,022		1,179	1,102		4,732	4,885	0,000	212,97	199,787	0,000	2,10	2,515	0,000
	6,0	0,027	0,023		1,011	1,036		4,970	4,598	0,000	197,48	187,455	0,000	2,25	2,369	0,000
	6,5	0,027	0,024		0,895	0,990		5,199	4,322	0,000	167,31	163,432	0,000	2,35	2,272	0,000
	7,0	0,027	0,030		1,037	1,046		5,122	4,414	0,000	119,87	125,664	0,000	2,81	1,835	0,000
M3	5,0	0,027	0,032	$d > 1$	1,957	1,409	$d > 1$	3,860	5,938	0,000	226,92	210,899	0,000	2,15	2,466	0,000
	5,5	0,027	0,029		1,587	1,263		4,314	5,390	0,000	212,97	199,787	0,000	2,15	2,466	0,000
	6,0	0,027	0,026		1,228	1,122		4,765	4,845	0,000	216,52	202,613	0,000	2,40	2,223	0,000
	6,5	0,027	0,024		0,911	0,996		5,178	4,347	0,000	208,93	196,576	0,000	2,46	2,175	0,000
	7,0	0,027	0,027		0,850	0,972		5,305	4,193	0,000	190,62	181,995	0,000	2,61	2,029	0,000

Tabela C7. Determinação das diferenças entre resultados dos ensaios e número de diferenças maiores que o valor de repetibilidade – mistura M1.

mistura	M1					valor de repetibilidade		n° de diferenças acima	
teor	4,5%								
parâmetros	diferenças entre determinações			total	modelo 1	modelo 2	modelo 1	modelo 2	
D _a	0,045	0,032	0,013	3	0,027	0,024	2	2	
V _v (%)	1,71	1,25	0,46	3	1,555	1,250	1	1	
RBV (%)	7,07	5,28	1,79	3	4,133	5,609	2	1	
EM (kgf)	128	24	104	3	338,164	299,474	0	0	
EM (0,01")	1	0	1	3	1,893	2,709	0	0	

mistura	M1					valor de repetibilidade		n° de diferenças acima	
teor	5,0%								
parâmetros	diferenças entre determinações			total	modelo 1	modelo 2	modelo 1	modelo 2	
D _a	0,005	0,003	0,002	3	0,028	0,021	0	0	
V _v (%)	0,22	0,13	0,09	3	1,208	1,113	0	0	
RBV (%)	1,01	0,59	0,42	3	4,620	5,020	0	0	
EM (kgf)	80	81	161	3	271,370	246,291	0	0	
EM (0,01")	1	1	2	3	2,149	2,466	0	0	

mistura	M1					valor de repetibilidade		n° de diferenças acima	
teor	5,5%								
parâmetros	diferenças entre determinações			total	modelo 1	modelo 2	modelo 1	modelo 2	
D _a	0,025	0,007	0,018	3	0,028	0,019	0	1	
V _v (%)	0,97	0,3	0,67	3	0,886	0,986	1	0	
RBV (%)	4,69	1,47	3,22	3	5,088	4,455	0	1	
EM (kgf)	184	123	61	3	264,917	241,152	0	0	
EM (0,01")	1	2	1	3	2,302	2,320	0	0	

mistura	M1					valor de repetibilidade		n° de diferenças acima	
teor	6,0%								
parâmetros	diferenças entre determinações			total	modelo 1	modelo 2	modelo 1	modelo 2	
D _a	0,023	0,028	0,005	3	0,028	0,018	0	2	
V _v (%)	0,89	1,07	0,18	3	0,602	0,874	2	2	
RBV (%)	4,53	5,48	0,95	3	5,506	3,951	0	2	
EM (kgf)	186	87	99	3	237,41	219,249	0	0	
EM (0,01")	3	2	1	3	2,81	1,835	1	2	

mistura	M1					valor de repetibilidade		n° de diferenças acima	
teor	6,5%								
parâmetros	diferenças entre determinações			total	modelo 1	modelo 2	modelo 1	modelo 2	
D _a	0,003	0,004	0,007	3	0,028	0,020	0	0	
V _v (%)	0,12	0,16	0,28	3	0,525	0,844	0	0	
RBV (%)	0,63	0,77	1,40	3	5,645	3,782	0	0	
EM (kgf)	23	18	5	3	206,11	194,328	0	0	
EM (0,01")	0	0	0	3	2,76	1,883	0	0	

Tabela C8. Determinação das diferenças entre resultados dos ensaios e número de diferenças maiores que o valor de repetibilidade – mistura M2.

mistura	M2					valor de repetibilidade		nº de diferenças acima	
teor	5,0%								
parâmetros	diferenças entre determinações			total	modelo 1	modelo 2	modelo 1	modelo 2	
D _a	0,017	0,046	0,029	3	0,027	0,023	2	2	
V _v (%)	0,68	1,78	1,1	3	1,112	1,194	1	1	
RBV (%)	2,97	7,4	4,43	3	4,379	5,312	2	1	
EM (kgf)	208	497	289	3	257,979	235,628	2	2	
EM (0,01")	1	0	1	3	1,944	2,660	0	0	

mistura	M2					valor de repetibilidade		nº de diferenças acima	
teor	5,5%								
parâmetros	diferenças entre determinações			total	modelo 1	modelo 2	modelo 1	modelo 2	
D _a	0,028	0,027	0,001	3	0,028	0,022	0	2	
V _v (%)	1,09	1,06	0,03	3	1,179	1,102	0	0	
RBV (%)	4,9	4,79	0,11	3	4,732	4,885	2	1	
EM (kgf)			76	1	212,966	199,787	0	0	
EM (0,01")	1	1	0	3	2,097	2,515	0	0	

mistura	M2					valor de repetibilidade		nº de diferenças acima	
teor	6,0%								
parâmetros	diferenças entre determinações			total	modelo 1	modelo 2	modelo 1	modelo 2	
D _a	0,001			1	0,027	0,000	0	1	
V _v (%)	0,05			1	1,011	1,036	0	0	
RBV (%)	0,24	1,6	1,36	3	4,970	4,598	0	0	
EM (kgf)	24			1	197,478	187,455	0	0	
EM (0,01")	1	1	0	3	2,251	2,369	0	0	

mistura	M2					valor de repetibilidade		nº de diferenças acima	
teor	6,5%								
parâmetros	diferenças entre determinações			total	modelo 1	modelo 2	modelo 1	modelo 2	
D _a			0,004	1	0,027	0,024	0	0	
V _v (%)			0,16	1	0,895	0,990	0	0	
RBV (%)			0,71	1	5,199	4,322	0	0	
EM (kgf)	57	26	83	3	167,307	163,432	0	0	
EM (0,01")	1	1	0	3	2,353	2,272	0	0	

mistura	M2					valor de repetibilidade		nº de diferenças acima	
teor	7,0%								
parâmetros	diferenças entre determinações			total	modelo 1	modelo 2	modelo 1	modelo 2	
D _a	0,043	0,011	0,032	3	0,027	0,030	2	2	
V _v (%)	1,71	0,43	1,28	3	1,037	1,046	2	2	
RBV (%)	6,98	1,84	5,14	3	5,122	4,414	2	2	
EM (kgf)	207,00	95,00	112,00	3	119,874	125,664	1	1	
EM (0,01")	0	1	1	3	2,814	1,835	0	0	

Tabela C9. Determinação das diferenças entre resultados dos ensaios e número de diferenças maiores que o valor de repetibilidade – mistura M3.

mistura	M3				valor de repetibilidade		nº de diferenças acima	
teor	5,0%							
parâmetros	diferenças entre determinações			total	modelo 1	modelo 2	modelo 1	modelo 2
D _a	0,017	0,005	0,012	3	0,027	0,032	0	0
V _v (%)	0,65	0,19	0,46	3	1,957	1,409	0	0
RBV (%)	2,23	0,67	1,56	3	3,860	5,938	0	0
EM (kgf)	18	73	91	3	226,922	210,899	0	0
EM (0,01")	3	3	0	3	2,149	2,466	2	2

mistura	M3				valor de repetibilidade		nº de diferenças acima	
teor	5,5%							
parâmetros	diferenças entre determinações			total	modelo 1	modelo 2	modelo 1	modelo 2
D _a			0,006	1	0,027	0,029	0	0
V _v (%)			0,2	1	1,587	1,263	0	0
RBV (%)			0,75	1	4,314	5,390	0	0
EM (kgf)			76	1	212,966	199,787	0	0
EM (0,01")			2	1	2,149	2,466	0	0

mistura	M3				valor de repetibilidade		nº de diferenças acima	
teor	6,0%							
parâmetros	diferenças entre determinações			total	modelo 1	modelo 2	modelo 1	modelo 2
D _a	0,007	0,003	0,01	3	0,027	0,026	0	0
V _v (%)	0,29	0,1	0,39	3	1,228	1,122	0	0
RBV (%)	1,2	0,42	1,62	3	4,765	4,845	0	0
EM (kgf)	45	64	109	3	216,515	202,613	0	0
EM (0,01")	1,00	3,00	4,00	3	2,404	2,223	2	2

mistura	M3				valor de repetibilidade		nº de diferenças acima	
teor	6,5%							
parâmetros	diferenças entre determinações			total	modelo 1	modelo 2	modelo 1	modelo 2
D _a	1E-04			1	0,027	0,024	0	0
V _v (%)	0			1	0,911	0,996	0	0
RBV (%)	0			1	5,178	4,347	0	0
EM (kgf)	41	18	23	3	208,932	196,576	0	0
EM (0,01")	0,00			1	2,456	2,175	0	0

mistura	M3				valor de repetibilidade		nº de diferenças acima	
teor	7,0%							
parâmetros	diferenças entre determinações			total	modelo 1	modelo 2	modelo 1	modelo 2
D _a		0,004	0,009	2	0,027	0,027	0	0
V _v (%)	0,51	0,14	0,37	3	0,850	0,972	0	0
RBV (%)	2,23	0,64	1,59	3	5,305	4,193	0	0
EM (kgf)	225,00	73,00	298,00	3	190,621	181,995	2	2
EM (0,01")			0	1	2,609	2,029	0	0

Os valores de probabilidade de ocorrência de valores menores ou iguais ao valor de repetibilidade apropriado, para as dosagens Marshall, estão indicados na Tabela 5.18, no Capítulo 5 (pág. 169).

Tabela C10. Variação dos resultados de resistência à tração para as três misturas.

mistura	resistência à tração (MPa)			média	dp	cv (%)	diferenças entre determinações		
M1	1,185	1,264	1,390	1,28	0,10	8,08	0,079	0,205	0,126
M2	0,460	0,523	0,566	0,52	0,05	10,33	0,063	0,106	0,043
M3	0,524	0,493	0,539	0,52	0,02	4,52	0,031	0,015	0,046

Tabela C11. Equações de repetibilidade em função da média "m" dos valores de resistência à tração das três misturas, para os três modelos recomendados pela ISO 5725-2/94, para nível de confiança de 95%.

resistência à tração (kPa)				Eq. I	Equação II										Equação III					
mistura	média	dp (s)	r	r/m	W ₀	m.W ₀	m ² .W ₀	r.W ₀	r.m.W ₀	W ₁	m.W ₁	m ² .W ₁	r.W ₁	r.m.W ₁	log m	(log m) ²	log r	log m . log r		
M1	1,280	0,103	0,290	0,226	11,931	15,268	19,538	3,454	4,420	0,289	0,369	0,473	0,084	0,107	0,107	0,011	-0,538	-0,058		
M2	0,516	0,053	0,149	0,289	44,875	23,171	11,964	6,699	3,459	0,079	0,041	0,021	0,012	0,006	-0,287	0,082	-0,826	0,237		
M3	0,519	0,023	0,066	0,127	231,770	120,212	62,350	15,224	7,896	0,079	0,041	0,021	0,005	0,003	-0,285	0,081	-1,183	0,337		
				Σ	0,642	288,577	158,651	93,852	25,377	15,775	0,447	0,451	0,515	0,101	0,116	-0,465	0,175	-2,547	0,517	
					0,214	(T ₁)	(T ₂)	(T ₃)	(T ₄)	(T ₅)	(T ₁)	(T ₂)	(T ₃)	(T ₄)	(T ₅)	(T ₁)	(T ₂)	(T ₃)	(T ₄)	
				(b)					a ₁	-0,063					a ₂	-0,016			c	-0,666
									b ₁	0,275					b ₂	0,239			d	-9
																			q	3

Tabela C12. Variação dos resultados de módulo de resiliência (MPa) para as três misturas.

mistura	M _R (MPa) – direção 1				média	dp	cv (%)	diferenças entre determinações					
M1	5.778	8.072	3.522	5.422	5.699	1.867	32,76	2.294	2.256	356	4.550	2.650	1.900
M2	2.258	2.318	2.428		2.335	86	3,69	60	170		110		
M3	1.540	2.645	1.986	1.371	1.886	569	30,17	1.105	446	169	659	1.274	615

mistura	M _R (MPa) – direção 2				média	dp	cv (%)	diferenças entre determinações					
M1	7.375	5.005	6.481	11.684	7.636	2.870	37,58	2.370	894	4.309	1.476	6.679	5.203
M2	1.861	1.701	1.798	1.854	1.804	74	4,10	160	63	7	97	153	56
M3	973	1.247		1.058	1.093	140	12,84	274		85		189	

mistura	M _R (MPa) - média d1 e d2				média	dp	cv (%)	diferenças entre determinações					
M1	6.577	6.539	5.002	8.553	6.667	1.456	21,83	38	1.575	1.977	1.537	2.015	3.552
M2	2.060	2.010	2.113		2.061	52	2,51	50	54		104		
M3	1.257	1.946	2.134	1.215	1.638	471	28,76	690	877	42	188	732	919

Tabela C13. Equações de repetibilidade em função da média "m" dos valores de módulo de resiliência das três misturas, para os 3 modelos recomendados pela ISO 5725/94, para nível de confiança de 95%.

M _R (MPa) – direção 1				Eq. I	Equação II										Equação III			
mistura	média	dp(s)	r	r/m	W ₀	m.W ₀	m ² .W ₀	r.W ₀	r.m.W ₀	W ₁	m.W ₁	m ² .W ₁	r.W ₁	r.m.W ₁	log m	(log m) ²	log r	log m . log r
M1	5.699	1.867	5.227	0,917	0,000000	0,000	1,189	0,000	1,090	2.282	13.002.560	74.095.090.933	11.926.008	67.960.353.952	3,756	14,106	3,718	13,965
M2	2.335	86	241	0,103	0,000017	0,040	93,530	0,004	9,671	323	754,018	1.760.381.026	77,966	182.025.248	3,368	11,345	2,383	8,026
M3	1.886	569	1.593	0,845	0,000000	0,001	1,401	0,001	1,184	61	115,794	218.329.869	97,830	184.458.355	3,275	10,728	3,202	10,489
Σ				1,865	0,000018	0,041	96,119	0,005	11,945	2.666	13.872.373	76.073.801.828	12.101.804	68.326.837.556	10,399	36,179	9,303	32,479
				0,622	(T ₁)	(T ₂)	(T ₃)	(T ₄)	(T ₅)	(T ₁)	(T ₂)	(T ₃)	(T ₄)	(T ₅)	(T ₁)	(T ₂)	(T ₃)	(T ₄)
				(b)					a ₁	-1,498							c	-3,034
									b ₁	0,763							d	-499
													a ₂	-2,623			q	3
													b ₂	1,376				

M _R (MPa) – direção 2				Eq. I	Equação II										Equação III			
mistura	média	dp(s)	r	r/m	W ₀	m.W ₀	m ² .W ₀	r.W ₀	r.m.W ₀	W ₁	m.W ₁	m ² .W ₁	r.W ₁	r.m.W ₁	log m	(log m) ²	log r	log m . log r
M1	7.636	2.870	8.036	1,052	0,000000	0,000	0,903	0,000	0,950	3.410	26.040.512	198.851.857.852	27.403.657	209.261.174.519	3,883	15,077	3,905	15,163
M2	1.804	74	207	0,115	0,000023	0,042	75,924	0,005	8,713	14	24,643	44.442.890	2,828	5.100.500	3,256	10,602	2,316	7,541
M3	1.093	140	393	0,359	0,000006	0,007	7,742	0,003	2,782	-400	-437,351	-477.878.383	-157,183	-171.748.749	3,038	9,232	2,594	7,882
Σ				1,527	0,000030	0,049	84,569	0,008	12,446	3,024	25.627.804	198.418.422.360	27.249.302	209.094.526.271	10,177	34,911	8,815	30,586
				0,509	(T ₁)	(T ₂)	(T ₃)	(T ₄)	(T ₅)	(T ₁)	(T ₂)	(T ₃)	(T ₄)	(T ₅)	(T ₁)	(T ₂)	(T ₃)	(T ₄)
				(b)					a ₁	224							c	-3,070
									b ₁	0,017							d	-157
													a ₂	-846			q	3
													b ₂	1,163				

Tabela C13. Equações de repetibilidade em função da média "m" dos valores de módulo de resiliência das três misturas, para os três modelos recomendados pela ISO 5725-2/94, para nível de confiança de 95%. (cont.)

M _R (MPa) – direcoes 1 e 2				Eq. I	Equação II										Equação III			
mistura	média	dp (s)	r	r/m	W ₀	m.W ₀	m².W ₀	r.W ₀	r.m.W ₀	W ₁	m.W ₁	m².W ₁	r.W ₁	r.m.W ₁	log m	(log m)²	log r	log m . log r
M1	6.667	1.456	4.075	0,611	0,000000	0,000	2,676	0,000	1,636	2,846	18.974.913	126.512.861.569	11.598.456	77.331.258.029	3,824	14,623	3,610	13,805
M2	2.061	52	145	0,070	0,000048	0,098	202,168	0,007	14,219	163	336,741	693.911.840	23.683	48.803.132	3,314	10,983	2,161	7,162
M3	1.638	471	1.319	0,805	0,000001	0,001	1,543	0,001	1,242	-83	-135.803	-222.393.590	-109.343	-179.063.410	3,214	10,331	3,120	10,029
			Σ	1,487	0,000048	0,099	206,387	0,008	17,097	2,926	19.175.852	126.984.379.820	11.512,796	77.200.997.751	10,352	35,936	8,891	30,996
				0,496	(T ₁)	(T ₂)	(T ₃)	(T ₄)	(T ₅)	(T ₁)	(T ₂)	(T ₃)	(T ₄)	(T ₅)	(T ₁)	(T ₂)	(T ₃)	(T ₄)
			(b)					a ₁	-1,037				a ₂	-4,735			c	-2,101
								b ₁	0,582				b ₂	1,323			d	-288
																	q	3

Tabela C14. Equações da repetibilidade "r" em função da média "m" dos resultados de resistência à tração e módulo de resiliência para os três modelos sugeridos pela ISO 5725-2/94, com nível de confiança de 95%.

propriedade		modelos		
		r = b.m	r = a + b.m	r = c.m ^d
resistência à tração		r = 0,214.m	r = -0,016 + 0,239.m	r = -0,666.m ⁻⁹
módulo de resiliência	d1	r = 0,622.m	r = -2623 + 1,376.m	r = -3,034.m ⁻¹⁹⁹
	d2	r = 0,509.m	r = -846 + 1,163.m	r = -3,070.m ⁻¹⁵⁷
	d1 e d2	r = 0,496.m	r = -4735 + 1,323.m	r = -2,101.m ⁻²⁸⁸

Tabela C15. Valores de repetibilidade "r" para os resultados dos ensaios de resistência à tração e módulo de resiliência das três misturas, de acordo com os modelos da ISO 5725-2/94, para nível de confiança de 95%.

mistura	módulo de resiliência											
	resistência à tração			d1			d2			d1 e d2		
	r = b.m	r = a + b.m	r = c.m ^d	r = b.m	r = a + b.m	r = c.m ^d	r = b.m	r = a + b.m	r = c.m ^d	r = b.m	r = a + b.m	r = c.m ^d
M1	0,274	0,289	-0,08	3543,453	5220,866	0,00000	3885,606	8035,531	0,00000	3304,233	4085,848	0,00000
M2	0,110	0,107	-230,15	1451,747	590,704	0,00000	917,687	1251,272	0,00000	1021,230	-2008,654	0,00000
M3	0,111	0,108	-221,15	1172,446	-27,553	0,00000	555,989	424,479	0,00000	811,578	-2568,322	0,00000

Os valores de probabilidade de ocorrência de valores menores ou iguais ao valor de repetibilidade apropriado, para os ensaios de resistência à tração e módulo de resiliência, estão indicados na Tabela 5.19, no Capítulo 5 (pág. 169).

Tabela C16. Determinação das diferenças entre resultados dos ensaios e número de diferenças maiores que o valor de repetibilidade.

propriedade	resistência à tração				valor de repetibilidade		nº de diferenças acima	
mistura	diferenças entre determinações			total	modelo 1	modelo 2	modelo 1	modelo 2
M1	0,079	0,205	0,126	3	0,274	0,289	0	0
M2	0,063	0,106	0,043	3	0,110	0,107	0	0
M3	0,031	0,015	0,046	3	0,111	0,108	0	0

propriedade	módulo de resiliência – direção 1							valor de repetibilidade		nº de diferenças acima	
mistura	diferenças entre determinações						total	modelo 1	modelo 2	modelo 1	modelo 2
M1	2.294	2.256	356	4.550	2.650	1.900	6	3543	5221	1	0
M2	60	170		110			3	1452	591	0	0
M3	1.105	446	169	659	1.274	615	6	1172	-28	1	6

Tabela C16. Determinação das diferenças entre resultados dos ensaios e número de diferenças maiores que o valor de repetibilidade. (cont.)

propriedade	módulo de resiliência – direção 2							valor de repetibilidade		nº de diferenças acima	
mistura	diferenças entre determinações						total	modelo 1	modelo 2	modelo 1	modelo 2
M1	2.370	894	4.309	1.476	6.679	5.203	6	3886	8036	3	0
M2	160	63	7	97	153	56	6	918	1251	0	0
M3	274		85		189		3	556	424	0	0

propriedade	módulo de resiliência – direções 1 e 2							valor de repetibilidade		nº de diferenças acima	
mistura	diferenças entre determinações						total	modelo 1	modelo 2	modelo 1	modelo 2
M1	38	1.575	1.977	1.537	2.015	3.552	6	3304	4086	1	0
M2	50	54		104			3	1021	-2009	0	3
M3	690	877	42	188	732	919	6	812	-2568	2	6

Tabela C17. Variação dos resultados dos ensaios de fluência por compressão uniaxial estática, para tensão de 0,4 MPa.

parâmetro	deformação total													
	determinação													
mistura	1	2	3	4	média	dp	cv (%)	diferenças entre determinações						
M1	0,489	0,487	0,537	0,465	0,49	0,03	6,14	0,002	0,048	0,024	0,050	0,022	0,072	
M2	0,475	0,411	0,444	0,400	0,43	0,03	7,85	0,064	0,031	0,075	0,033	0,011	0,044	
M3	0,475	0,508	0,457		0,48	0,03	5,39	0,033	0,018		0,051			

Tabela C17. Variação dos resultados dos ensaios de fluência por compressão uniaxial estática, para tensão de 0,4 MPa. (cont.)

parâmetro	deformação recuperável													
	determinação													
mistura	1	2	3	4	média	dp	cv (%)	diferenças entre determinações						
M1	0,261	0,292	0,276	0,289	0,28	0,01	5,06	0,031	0,015	0,028	0,016	0,003	0,013	
M2	0,285	0,300	0,301	0,272	0,29	0,01	4,76	0,015	0,016	0,013	0,001	0,028	0,029	
M3	0,301	0,317	0,331		0,32	0,02	4,75	0,016	0,030		0,014			

parâmetro	deformação não recuperável													
	determinação													
mistura	1	2	3	4	média	dp	cv (%)	diferenças entre determinações						
M1	0,228	0,195	0,260	0,177	0,22	0,04	17,06	0,033	0,032	0,051	0,065	0,018	0,083	
M2	0,190	0,111	0,143	0,128	0,14	0,03	23,74	0,079	0,047	0,062	0,032	0,017	0,015	
M3	0,174	0,190	0,126		0,16	0,03	20,39	0,016	0,048		0,064			

parâmetro	recuperação													
	determinação													
mistura	1	2	3	4	média	dp	cv (%)	diferenças entre determinações						
M1	53,330	60,000	51,520	62,070	56,73	5,10	8,98	6,670	1,810	8,740	8,480	2,070	10,550	
M2	60,000	73,080	67,860	68,000	67,24	5,40	8,03	13,080	7,860	8,000	5,220	5,080	0,140	
M3	63,330	62,500	72,410		66,08	5,50	8,32	0,830	9,080		9,910			

Tabela C17. Variação dos resultados dos ensaios de fluência por compressão uniaxial estática, para tensão de 0,4 MPa. (cont.)

parâmetro	M _F (MPa) - 3 600 s												
	determinação												
mistura	1	2	3	4	média	dp	cv (%)	diferenças entre determinações					
M1	81,730	82,130	74,550	85,930	81,09	4,75	5,86	0,400	7,180	4,200	7,580	3,800	11,380
M2	84,130	97,380	90,140	100,000	92,91	7,19	7,74	13,250	6,010	15,870	7,240	2,620	9,860
M3	84,270	78,750	87,450		83,49	4,40	5,27	5,520	3,180		8,700		

parâmetro	M _F (MPa) - 4 500 s												
	determinação												
mistura	1	2	3	4	média	dp	cv (%)	diferenças entre determinações					
M1	175,140	205,330	153,750	226,550	190,19	32,17	16,92	30,190	21,390	51,410	51,580	21,220	72,800
M2	210,330	361,710	280,440	312,500	291,25	63,46	21,79	151,380	70,110	102,170	81,270	49,210	32,060
M3	229,820	210,000	317,000		252,27	56,92	22,56	19,820	87,180		107,000		

parâmetro	inclinação do trecho reto												
	determinação												
mistura	1	2	3	4	média	dp	cv (%)	diferenças entre determinações					
M1	0,033	0,032		0,032	0,03	0,00	1,79	0,001		0,001		0,000	
M2	0,016	0,016	0,016		0,02	0,00	0,00	0,000	0,000		0,000		
M3		0,016			0,02	-	-						

Tabela C18. Equações de repetibilidade em função da média "m" dos resultados do ensaio de fluência estática das três misturas, tensão de 0,4 MPa, para os três modelos recomendados pela ISO 5725-2/94, para nível de confiança de 95%.

deformação total				Eq. I	Equação II								Equação III							
mistura	média	dp (s)	r	r/m	W ₀	m.W ₀	m².W ₀	r.W ₀	r.m.W ₀	W ₁	m.W ₁	m².W ₁	r.W ₁	r.m.W ₁	log m	(log m)²	log r	log m . log r		
M1	0,495	0,030	0,085	0,172	138,492	68,484	33,865	11,768	5,819	0,077	0,038	0,019	0,007	0,003	-0,306	0,094	-1,071	0,327		
M2	0,433	0,034	0,095	0,220	110,689	47,873	20,705	10,521	4,550	0,092	0,040	0,017	0,009	0,004	-0,364	0,133	-1,022	0,372		
M3	0,480	0,026	0,072	0,151	190,659	91,516	43,928	13,808	6,628	0,080	0,039	0,018	0,006	0,003	-0,319	0,102	-1,140	0,363		
				Σ	0,542	439,840	207,874	98,498	36,097	16,998	0,249	0,116	0,054	0,021	0,010	-0,989	0,328	-3,233	1,063	
					0,181	(T ₁)	(T ₂)	(T ₃)	(T ₄)	(T ₅)	(T ₁)	(T ₂)	(T ₃)	(T ₄)	(T ₅)	(T ₁)	(T ₂)	(T ₃)	(T ₄)	
				(b)					a ₁	0,198					a ₂	0,201				
									b ₁	-0,245					b ₂	-0,249				
																	q	3		

deformação recuperável				Eq. I	Equação II								Equação III							
mistura	média	dp (s)	r	r/m	W ₀	m.W ₀	m².W ₀	r.W ₀	r.m.W ₀	W ₁	m.W ₁	m².W ₁	r.W ₁	r.m.W ₁	log m	(log m)²	log r	log m . log r		
M1	0,280	0,014	0,040	0,142	636,694	177,956	49,739	25,233	7,053	0,039	0,011	0,003	0,002	0,000	-0,554	0,306	-1,402	0,776		
M2	0,290	0,014	0,039	0,133	672,501	194,689	56,362	25,933	7,507	0,040	0,011	0,003	0,002	0,000	-0,538	0,290	-1,414	0,761		
M3	0,316	0,015	0,042	0,133	566,055	179,062	56,643	23,792	7,526	0,042	0,013	0,004	0,002	0,001	-0,500	0,250	-1,376	0,688		
			Σ	0,408	1.875,250	551,707	162,744	74,957	22,086	0,120	0,036	0,011	0,005	0,001	-1,592	0,846	-4,192	2,225		
				0,136	(T ₁)	(T ₂)	(T ₃)	(T ₄)	(T ₅)	(T ₁)	(T ₂)	(T ₃)	(T ₄)	(T ₅)	(T ₁)	(T ₂)	(T ₃)	(T ₄)		
			(b)						a ₁	0,017					a ₂	0,017			c	-1,094
									b ₁	0,078					b ₂	0,079			d	-2,899
																			q	3

Tabela C18. Equações de repetibilidade em função da média "m" dos resultados do ensaio de fluência estática das três misturas, tensão de 0,4 MPa, para os três modelos recomendados pela ISO 5725-2/94, para nível de confiança de 95%. (cont.)

deformação não recuperável				Eq. I	Equação II										Equação III					
mistura	média	dp (s)	r	r/m	W ₀	m.W ₀	m².W ₀	r.W ₀	r.m.W ₀	W ₁	m.W ₁	m².W ₁	r.W ₁	r.m.W ₁	log m	(log m)²	log r	log m . log r		
M1	0,215	0,037	0,103	0,478	94,763	20,374	4,380	9,735	2,093	0,102	0,022	0,005	0,010	0,002	-0,668	0,446	-0,988	0,660		
M2	0,143	0,034	0,095	0,665	110,657	15,824	2,263	10,519	1,504	0,093	0,013	0,002	0,009	0,001	-0,845	0,713	-1,022	0,863		
M3	0,163	0,033	0,093	0,571	114,980	18,780	3,067	10,723	1,751	0,096	0,016	0,003	0,009	0,001	-0,787	0,619	-1,030	0,811		
				Σ	1,714	320,400	54,978	9,711	30,977	5,349	0,291	0,051	0,009	0,028	0,005	-2,299	1,778	-3,041	2,334	
					0,571	(T ₁)	(T ₂)	(T ₃)	(T ₄)	(T ₅)	(T ₁)	(T ₂)	(T ₃)	(T ₄)	(T ₅)	(T ₁)	(T ₂)	(T ₃)	(T ₄)	
				(b)					a ₁	0,076					a ₂	0,076			c	-0,849
									b ₁	0,120					b ₂	0,123			d	-286
																			q	3

recuperação				Eq. I	Equação II										Equação III			
mistura	média	dp (s)	r	r/m	W ₀	m.W ₀	m².W ₀	r.W ₀	r.m.W ₀	W ₁	m.W ₁	m².W ₁	r.W ₁	r.m.W ₁	log m	(log m)²	log r	log m . log r
M1	56,730	5,096	14,269	0,252	0,005	0,279	15,806	0,070	3,976	14,289	811	45.985	204	11.567	1,754	3,076	1,154	2,025
M2	67,235	5,400	15,120	0,225	0,004	0,294	19,773	0,066	4,447	15,298	1.029	69.154	231	15.552	1,828	3,340	1,180	2,156
M3	66,080	5,498	15,393	0,233	0,004	0,279	18,428	0,065	4,293	15,187	1.004	66.314	234	15.448	1,820	3,313	1,187	2,161
			Σ	0,709	0,014	0,852	54,006	0,201	12,715	44,773	2.843	181.454	669	42.567	5,401	9,729	3,521	6,341
				0,236	(T ₁)	(T ₂)	(T ₃)	(T ₄)	(T ₅)	(T ₁)	(T ₂)	(T ₃)	(T ₄)	(T ₅)	(T ₁)	(T ₂)	(T ₃)	(T ₄)
			(b)					a ₁	8,840				a ₂	8,853			c	0,449
								b ₁	0,096				b ₂	0,096			d	-3.847
																	q	3

Tabela C18. Equações de repetibilidade em função da média "m" dos resultados do ensaio de fluência estática das três misturas, tensão de 0,4 MPa, para os três modelos recomendados pela ISO 5725-2/94, para nível de confiança de 95%. (cont.)

M _F (MPa) - 3 600 s				Eq. I	Equação II										Equação III			
mistura	média	dp(s)	r	r/m	W ₀	m.W ₀	m ² .W ₀	r.W ₀	r.m.W ₀	W ₁	m.W ₁	m ² .W ₁	r.W ₁	r.m.W ₁	log m	(log m) ²	log r	log m . log r
M1	81,085	4,750	13,300	0,164	0,006	0,458	37,168	0,075	6,097	12,115	982	79.655	161	13.065	1,909	3,644	1,124	2,145
M2	92,913	7,188	20,127	0,217	0,002	0,229	21,310	0,050	4,616	19,434	1.806	167.771	391	36.343	1,968	3,873	1,304	2,566
M3	83,490	4,402	12,326	0,148	0,007	0,550	45,880	0,081	6,773	13,603	1.136	94.824	168	13.999	1,922	3,693	1,091	2,096
Σ				0,528	0,015	1,237	104,359	0,206	17,486	45,153	3.924	342.250	720	63.408	5,799	11,210	3,518	6,807
				0,176	(T ₁)	(T ₂)	(T ₃)	(T ₄)	(T ₅)	(T ₁)	(T ₂)	(T ₃)	(T ₄)	(T ₅)	(T ₁)	(T ₂)	(T ₃)	(T ₄)
				(b)					a ₁	-38,062					a ₂	-41,710	c	-5,512
									b ₁	0,619					b ₂	0,663	d	-7,021
																	q	3

M _F (MPa) - 4 500 s				Eq. I	Equação II										Equação III			
mistura	média	dp(s)	r	r/m	W ₀	m.W ₀	m ² .W ₀	r.W ₀	r.m.W ₀	W ₁	m.W ₁	m ² .W ₁	r.W ₁	r.m.W ₁	log m	(log m) ²	log r	log m . log r
M1	190,193	32,175	90,089	0,474	0,000	0,023	4,457	0,011	2,111	91,347	17.374	3.304.324	8.229	1.565.174	2,279	5,195	1,955	4,455
M2	291,245	63,459	177,685	0,610	0,000	0,009	2,687	0,006	1,639	185,480	54.020	15.733.121	32.957	9.598.572	2,464	6,073	2,250	5,544
M3	252,273	56,924	159,388	0,632	0,000	0,010	2,505	0,006	1,583	149,177	37.633	9.493.913	23.777	5.998.309	2,402	5,769	2,202	5,290
Σ				1,716	0,000	0,043	9,649	0,023	5,333	426,005	109.027	28.531.359	64.963	17.162.055	7,145	17,036	6,407	15,289
				0,572	(T ₁)	(T ₂)	(T ₃)	(T ₄)	(T ₅)	(T ₁)	(T ₂)	(T ₃)	(T ₄)	(T ₅)	(T ₁)	(T ₂)	(T ₃)	(T ₄)
				(b)					a ₁	-85,822					a ₂	-65,911	c	-1,802
									b ₁	0,932					b ₂	0,853	d	-1,723
																	q	3

Tabela C18. Equações de repetibilidade em função da média "m" dos resultados do ensaio de fluência estática das três misturas, tensão de 0,4 MPa, para os três modelos recomendados pela ISO 5725-2/94, para nível de confiança de 95%. (cont.)

ncinação do trecho reto				Eq. I	Equação II										Equação III				
mistura	média	dp (s)	r	r/m	W ₀	m.W ₀	m².W ₀	r.W ₀	r.m.W ₀	W ₁	m.W ₁	m².W ₁	r.W ₁	r.m.W ₁	log m	(log m)²	log r	log m . log r	
M1	0,032	0,001	0,002	0,050	382.653	12.372	400,043	618,590	20,001	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	-1,490	2,221	-2,791	4,160	
M2	0,016	0,000	0,000	0,000						#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	-1,796	3,225	-7,791	13,991	
M3	0,016	0,000	0,000	0,000						#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	-1,796	3,225	#NÚM!	#NÚM!	
			Σ	0,050	382.653	12.372	400,043	618,590	20,001	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	-5,082	8,672	#NÚM!	#NÚM!	
				0,017	(T ₁)	(T ₂)	(T ₃)	(T ₄)	(T ₅)	(T ₁)	(T ₂)	(T ₃)	(T ₄)	(T ₅)	(T ₁)	(T ₂)	(T ₃)	(T ₄)	
			(b)					a ₁	#DIV/0!					a ₂	#DIV/0!			c	#NÚM!
								b ₁	#DIV/0!					b ₂	#DIV/0!			d	#NÚM!
																		q	3

Tabela C19. Equações da repetibilidade "r" em função da média "m" dos resultados do ensaio de fluência estática das três misturas, tensão de 0,4 MPa, para os três modelos sugeridos pela ISO 5725-2/94, com nível de confiança de 95%.

parâmetro	modelo		
	r = b.m	r = a + b.m	r = c.m ^d
deformação total	r = 0,181.m	r = 0,201 - 0,249.m	r = - 1,506.m ⁻¹¹⁴⁰
deformação recuperável	r = 0,136.m	r = 0,017 + 0,079.m	r = - 1,094.m ⁻²⁸⁹⁹
deformação não recuperável	r = 0,571.m	r = 0,076 + 0,123.m	r = - 0,849.m ⁻²⁸⁶
recuperação	r = 0,236.m	r = 8,853 + 0,096.m	r = 0,449.m ⁻³⁸⁴⁷
módulo de fluência - 3 600 s	r = 0,176.m	r = - 41,710 + 0,663.m	r = - 5,512.m ⁻⁷⁰²¹
módulo de fluência - 4 500 s	r = 0,572.m	r = - 65,911 + 0,853.m	r = - 1,802.m ⁻¹⁷²³
inclinação do trecho reto	r = 0,017.m	-	-

Tabela C20. Valores de repetibilidade "r" para os resultados dos ensaios de fluência estática para as três misturas, tensão de 0,4 MPa, de acordo com os modelos da ISO 5725-2/94, para nível de confiança de 95%.

mistura	M1			M2			M3		
	r = b.m	r = a + b.m	r = c.m ^d	r = b.m	r = a + b.m	r = c.m ^d	r = b.m	r = a + b.m	r = c.m ^d
deformação total	0,089	0,078	#DIV/0!	0,078	0,093	#DIV/0!	0,087	0,081	#DIV/0!
deformação recuperável	0,038	0,039	#DIV/0!	0,039	0,040	#DIV/0!	0,043	0,042	#DIV/0!
deformação não recuperável	0,123	0,102	-5,78E+190	0,082	0,093	-2,45E+241	0,093	0,096	-7,65E+224
recuperação	13,414	14,293	0,00	15,898	15,300	0,00	15,625	15,190	0,00
módulo de fluência - 3 600 s	14,279	12,087	0,00	16,361	19,934	0,00	14,702	13,682	0,00
módulo de fluência - 4 500 s	108,763	96,396	0,00	166,550	182,632	0,00	144,264	149,375	0,00
inclinação do trecho reto	0,001	#DIV/0!	#NÚM!	0,000	#DIV/0!	#NÚM!	0,000	#DIV/0!	#NÚM!

Tabela C21. Determinação das diferenças entre resultados dos ensaios de fluência estática, tensão de 0,4 MPa, e número de diferenças maiores que o valor de repetibilidade, de acordo com os modelos da ISO 5725-2/94, para nível de confiança de 95%.

propriedade	deformação total							valor de repetibilidade		nº de diferenças acima	
	diferenças entre determinações						total	modelo 1	modelo 2	modelo 1	modelo 2
M1	0,002	0,048	0,024	0,050	0,022	0,072	6	0,089	0,078	0	0
M2	0,064	0,031	0,075	0,033	0,011	0,044	6	0,078	0,093	0	0
M3	0,033	0,018		0,051			3	0,087	0,081	0	0

Tabela C21. Determinação das diferenças entre resultados dos ensaios de fluência estática, tensão de 0,4 MPa, e número de diferenças maiores que o valor de repetibilidade, de acordo com os modelos da ISO 5725-2/94, para nível de confiança de 95%. (cont.)

propriedade	deformação recuperável							valor de repetibilidade		n° de diferenças acima	
mistura	diferenças entre determinações						total	modelo 1	modelo 2	modelo 1	modelo 2
M1	0,031	0,015	0,028	0,016	0,003	0,013	6	0,038	0,039	0	0
M2	0,015	0,016	0,013	0,001	0,028	0,029	6	0,039	0,040	0	0
M3	0,016	0,030		0,014			3	0,043	0,042	0	0

propriedade	deformação não recuperável							valor de repetibilidade		n° de diferenças acima	
mistura	diferenças entre determinações						total	modelo 1	modelo 2	modelo 1	modelo 2
M1	0,033	0,032	0,051	0,065	0,018	0,083	6	0,123	0,102	0	0
M2	0,079	0,047	0,062	0,032	0,017	0,015	6	0,082	0,093	0	0
M3	0,016	0,048		0,064			3	0,093	0,096	0	0

propriedade	recuperação							valor de repetibilidade		n° de diferenças acima	
mistura	diferenças entre determinações						total	modelo 1	modelo 2	modelo 1	modelo 2
M1	6,670	1,810	8,740	8,480	2,070	10,550	6	13,414	14,293	0	0
M2	13,080	7,860	8,000	5,220	5,080	0,140	6	15,898	15,300	0	0
M3	0,830	9,080		9,910			3	15,625	15,190	0	0

propriedade	M_F (MPa) - 3 600 s							valor de repetibilidade		n° de diferenças acima	
mistura	diferenças entre determinações						total	modelo 1	modelo 2	modelo 1	modelo 2
M1	0,400	7,180	4,200	7,580	3,800	11,380	6	14,279	12,087	0	0
M2	13,250	6,010	15,870	7,240	2,620	9,860	6	16,361	19,934	0	0
M3	5,520	3,180		8,700			3	14,702	13,682	0	0

Tabela C21. Determinação das diferenças entre resultados dos ensaios de fluência estática, tensão de 0,4 MPa, e número de diferenças maiores que o valor de repetibilidade, de acordo com os modelos da ISO 5725-2/94, para nível de confiança de 95%. (cont.)

propriedade	M _F (MPa) - 4 500 s							valor de repetibilidade		nº de diferenças acima	
mistura	diferenças entre determinações						total	modelo 1	modelo 2	modelo 1	modelo 2
M1	30,190	21,390	51,410	51,580	21,220	72,800	6	108,763	96,396	0	0
M2	151,380	70,110	102,170	81,270	49,210	32,060	6	166,550	182,632	0	0
M3	19,820	87,180		107,000			3	144,264	149,375	0	0

propriedade	inclinação do trecho reto							valor de repetibilidade		nº de diferenças acima	
mistura	diferenças entre determinações						total	modelo 1	modelo 2	modelo 1	modelo 2
M1	0,001		0,001		0,000		3	0,001	-	0	-
M2	0,000	0,000	0,016	0,000	0,016	0,016	6	0,000	-	2	-
M3	0,016	0,000		0,016			3	0,000	-	0	-

Os valores de probabilidade de ocorrência de valores menores ou iguais ao valor de repetibilidade apropriado, para o ensaio de fluência estática com tensão de 0,4 MPa, estão indicados na Tabela 5.20, no Capítulo 5 (pág. 170).

Tabela C22. Variação dos resultados dos ensaios de fluência por compressão uniaxial estática, para tensão de 0,7 MPa.

parâmetro	deformação total												
	determinação												
mistura	1	2	3	4	média	dp	cv (%)	diferenças entre determinações					
M1		0,647	0,648	0,617	0,64	0,02	2,76				0,001	0,030	0,031
M2	0,721	0,835	0,895	0,816	0,82	0,07	8,84	0,114	0,174	0,095	0,060	0,019	0,079
M3	0,711	0,806	0,659		0,73	0,07	10,28	0,095	0,052		0,147		

Tabela C22. Variação dos resultados dos ensaios de fluência por compressão uniaxial estática, para tensão de 0,7 MPa. (cont.)

parâmetro	deformação recuperável													
	determinação													
mistura	1	2	3	4	média	dp	cv (%)	diferenças entre determinações						
M1	0,407	0,437	0,405	0,422	0,42	0,01	3,57	0,030	0,002	0,015	0,032	0,015	0,017	
M2	0,465	0,449	0,415	0,432	0,44	0,02	4,90	0,016	0,050	0,033	0,034	0,017	0,017	
M3	0,458	0,521	0,487		0,49	0,03	6,45	0,063	0,029		0,034			

parâmetro	deformação não recuperável													
	determinação													
mistura	1	2	3	4	média	dp	cv (%)	diferenças entre determinações						
M1		0,210	0,243	0,195	0,22	0,02	11,37				0,033	0,015	0,048	
M2	0,256	0,385	0,479	0,384	0,38	0,09	24,35	0,129	0,223	0,128	0,094	0,001	0,095	
M3	0,253	0,284	0,173		0,24	0,06	24,20	0,031	0,080		0,111			

parâmetro	recuperação													
	determinação													
mistura	1	2	3	4	média	dp	cv (%)	diferenças entre determinações						
M1	50,000	67,500	62,500	68,420	62,11	8,48	13,65	17,500	12,500	18,420	5,000	0,920	5,920	
M2	64,440	53,850	46,430	52,940	54,42	7,46	13,70	10,590	18,010	11,500	7,420	0,910	6,510	
M3	64,440	64,710	73,810		67,65	5,33	7,88	0,270	9,370		9,100			

Tabela C22. Variação dos resultados dos ensaios de fluência por compressão uniaxial estática, para tensão de 0,7 MPa. (cont.)

parâmetro	M _F (MPa) - 3 600 s												
	determinação												
mistura	1	2	3	4	média	dp	cv (%)	diferenças entre determinações					
M1		108,150	107,980	113,470	109,87	3,12	2,84				0,170	5,320	5,490
M2	97,070	83,870	78,250	85,780	86,24	7,89	9,15	13,200	18,820	11,290	5,620	1,910	7,530
M3	98,470	86,880	106,170		97,17	9,71	9,99	11,590	7,700		19,290		

parâmetro	M _F (MPa) - 4 500 s												
	determinação												
mistura	1	2	3	4	média	dp	cv (%)	diferenças entre determinações					
M1	172,200	332,770	287,930	359,330	288,06	82,67	28,70	160,570	115,730	187,130	44,840	26,560	71,400
M2	273,000	181,710	146,070	182,290	195,77	54,20	27,69	91,290	126,930	90,710	35,640	0,580	36,220
M3	276,940	246,170	405,360		309,49	84,44	27,28	30,770	128,420		159,190		

parâmetro	inclinação do trecho reto												
	determinação												
mistura	1	2	3	4	média	dp	cv (%)	diferenças entre determinações					
M1	0,033	0,032	0,032		0,03	0,00	1,79	0,001	0,001		0,000		
M2	0,048	0,064	0,016	0,016	0,04	0,02	66,67	0,016	0,032	0,032	0,048	0,048	0,000
M3	0,047	0,047	0,031		0,04	0,01	22,17	0,000	0,016		0,016		

Tabela C23. Equações de repetibilidade em função da média "m" dos resultados do ensaio de fluência estática das três misturas, tensão de 0,7 MPa, para os três modelos recomendados pela ISO 5725-2/94, para nível de confiança de 95%.

deformação total				Eq. I	Equação II										Equação III				
mistura	média	dp (s)	r	r/m	W ₀	m.W ₀	m².W ₀	r.W ₀	r.m.W ₀	W ₁	m.W ₁	m².W ₁	r.W ₁	r.m.W ₁	log m	(log m)²	log r	log m . log r	
M1	0,637	0,018	0,049	0,077	411,013	261,952	166,951	20,273	12,921	0,051	0,033	0,021	0,003	0,002	-0,196	0,038	-1,307	0,256	
M2	0,817	0,072	0,202	0,247	24,490	20,002	16,337	4,949	4,042	0,233	0,191	0,156	0,047	0,039	-0,088	0,008	-0,694	0,061	
M3	0,725	0,075	0,209	0,288	22,956	16,651	12,077	4,791	3,475	0,141	0,102	0,074	0,029	0,021	-0,139	0,019	-0,680	0,095	
			Σ	0,613	458,459	298,605	195,365	30,013	20,438	0,425	0,325	0,250	0,079	0,061	-0,423	0,065	-2,682	0,412	
				0,204	(T ₁)	(T ₂)	(T ₃)	(T ₄)	(T ₅)	(T ₁)	(T ₂)	(T ₃)	(T ₄)	(T ₅)	(T ₁)	(T ₂)	(T ₃)	(T ₄)	
			(b)					a ₁	-0,596				a ₂	-0,252				c	-0,081
								b ₁	1,015				b ₂	0,572				d	-136
																		q	3

deformação recuperável				Eq. I	Equação II										Equação III			
mistura	média	dp (s)	r	r/m	W ₀	m.W ₀	m ² .W ₀	r.W ₀	r.m.W ₀	W ₁	m.W ₁	m ² .W ₁	r.W ₁	r.m.W ₁	log m	(log m) ²	log r	log m . log r
M1	0,418	0,015	0,042	0,100	573,908	239,750	100,156	23,956	10,008	0,043	0,018	0,007	0,002	0,001	-0,379	0,144	-1,379	0,523
M2	0,440	0,022	0,060	0,137	274,352	120,784	53,175	16,564	7,292	0,058	0,025	0,011	0,003	0,002	-0,356	0,127	-1,219	0,434
M3	0,489	0,032	0,088	0,181	128,278	62,685	30,632	11,326	5,535	0,090	0,044	0,022	0,008	0,004	-0,311	0,097	-1,054	0,328
			Σ	0,418	976,538	423,219	183,963	51,846	22,835	0,190	0,087	0,040	0,013	0,006	-1,046	0,367	-3,653	1,285
				0,139	(T ₁)	(T ₂)	(T ₃)	(T ₄)	(T ₅)	(T ₁)	(T ₂)	(T ₃)	(T ₄)	(T ₅)	(T ₁)	(T ₂)	(T ₃)	(T ₄)
			(b)					a ₁	-0,237				a ₂	-0,221			c	0,393
								b ₁	0,670				b ₂	0,633			d	-1,065
																	q	3

Tabela C23. Equações de repetibilidade em função da média "m" dos resultados do ensaio de fluência estática das três misturas, tensão de 0,7 MPa, para os três modelos recomendados pela ISO 5725-2/94, para nível de confiança de 95%. (cont.)

deformação não recuperável				Eq. I	Equação II										Equação III				
mistura	média	dp(s)	r	r/m	W ₀	m.W ₀	m².W ₀	r.W ₀	r.m.W ₀	W ₁	m.W ₁	m².W ₁	r.W ₁	r.m.W ₁	log m	(log m)²	log r	log m . log r	
M1	0,216	0.025	0,069	0,318	211,527	45,690	9,869	14,544	3,141	0,078	0,017	0,004	0.005	0,001	-0,666	0,443	-1,163	0,774	
M2	0,376	0.092	0,256	0,682	15,212	5,720	2,151	3,900	1,467	0,275	0,103	0,039	0,071	0,027	-0,425	0,180	-0,591	0,251	
M3	0,237	0.057	0,160	0,678	38,884	9,202	2,178	6,236	1,476	0,103	0,024	0,006	0.017	0,004	-0,626	0,392	-0,795	0,497	
			Σ	1,678	265,623	60,612	14,198	24,680	6,084	0,456	0,145	0,048	0,092	0,032	-1,716	1,015	-2,549	1,522	
				0,559	(T ₁)	(T ₂)	(T ₃)	(T ₄)	(T ₅)	(T ₁)	(T ₂)	(T ₃)	(T ₄)	(T ₅)	(T ₁)	(T ₂)	(T ₃)	(T ₄)	
			(b)					a ₁	-0,189					a ₂	-0,096			c	0,256
								b ₁	1,233					b ₂	0,941			d	-89
																	q	3	

recuperação				Eq. I	Equação II										Equação III			
mistura	média	dp(s)	r	r/m	W ₀	m.W ₀	m².W ₀	r.W ₀	r.m.W ₀	W ₁	m.W ₁	m².W ₁	r.W ₁	r.m.W ₁	log m	(log m)²	log r	log m . log r
M1	62,105	8,479	23,741	0,382	0,002	0,110	6,843	0,042	2,616	18,764	1.165	72.375	445	27.667	1,793	3,215	1,375	2,466
M2	54,415	7,456	20,876	0,384	0,002	0,125	6,795	0,048	2,607	22,488	1.224	66.587	469	25.545	1,736	3,013	1,320	2,291
M3	67,653	5,334	14,934	0,221	0,004	0,303	20,523	0,067	4,530	16,078	1.088	73.587	240	16.244	1,830	3,350	1,174	2,149
			Σ	0,987	0,009	0,538	34,160	0,157	9,753	57,330	3.477	212.550	1.155	69.456	5,359	9,578	3,869	6,906
				0,329	(T ₁)	(T ₂)	(T ₃)	(T ₄)	(T ₅)	(T ₁)	(T ₂)	(T ₃)	(T ₄)	(T ₅)	(T ₁)	(T ₂)	(T ₃)	(T ₄)
			(b)					a ₁	48,838				a ₂	41,199			c	3,655
								b ₁	-0,484				b ₂	-0,347			d	-3.044
																	q	3

Tabela C23. Equações de repetibilidade em função da média "m" dos resultados do ensaio de fluência estática das três misturas, tensão de 0,7 MPa, para os três modelos recomendados pela ISO 5725-2/94, para nível de confiança de 95%. (cont.)

M _F (MPa) - 3 600 s				Eq. I	Equação II										Equação III			
mistura	média	dp (s)	r	r/m	W ₀	m.W ₀	m².W ₀	r.W ₀	r.m.W ₀	W ₁	m.W ₁	m².W ₁	r.W ₁	r.m.W ₁	log m	(log m)²	log r	log m . log r
M1	109,867	3,122	8,741	0,080	0,013	1,438	157,988	0,114	12,569	9,185	1.009	110.871	80	8.821	2,041	4,165	0,942	1,922
M2	86,243	7,894	22,104	0,256	0,002	0,177	15,223	0,045	3,902	25,403	2.191	188.941	562	48.425	1,936	3,747	1,344	2,603
M3	97,173	9,710	27,188	0,280	0,001	0,131	12,774	0,037	3,574	17,899	1.739	169.014	487	47.289	1,988	3,950	1,434	2,851
			Σ	0,616	0,016	1,746	185,985	0,196	20,045	52,487	4.939	468.825	1.128	104.535	5,964	11,862	3,720	7,375
				0,205	(T ₁)	(T ₂)	(T ₃)	(T ₄)	(T ₅)	(T ₁)	(T ₂)	(T ₃)	(T ₄)	(T ₅)	(T ₁)	(T ₂)	(T ₃)	(T ₄)
			(b)					a ₁	84,608				a ₂	60,243			c	8,910
								b ₁	-0,686				b ₂	-0,412			d	-2.672
																	q	3

M _F (MPa) - 4 500 s				Eq. I	Equação II										Equação III				
mistura	média	dp (s)	r	r/m	W ₀	m.W ₀	m ² .W ₀	r.W ₀	r.m.W ₀	W ₁	m.W ₁	m ² .W ₁	r.W ₁	r.m.W ₁	log m	(log m) ²	log r	log m . log r	
M1	288,058	82,668	231,470	0,804	0,000	0,005	1,549	0,004	1,244	225,011	64.816	18.670.781	52.083	15.003.008	2,459	6,049	2,364	5,815	
M2	195,768	54,203	151,769	0,775	0,000	0,008	1,664	0,007	1,290	152,292	29.814	5.836.587	23.113	4.524.819	2,292	5,252	2,181	4,999	
M3	309,490	84,439	236,430	0,764	0,000	0,006	1,714	0,004	1,309	241,899	74.865	23.170.040	57.192	17.700.384	2,491	6,203	2,374	5,912	
				Σ	2,343	0,000	0,019	4,926	0,015	3,843	619,202	169.495	47.677.408	132.389	37.228.211	7,242	17,504	6,919	16,726
					0,781	(T ₁)	(T ₂)	(T ₃)	(T ₄)	(T ₅)	(T ₁)	(T ₂)	(T ₃)	(T ₄)	(T ₅)	(T ₁)	(T ₂)	(T ₃)	(T ₄)
				(b)				a ₁	-1,961			a ₂	2,452			c	-0.131		
								b ₁	0,788			b ₂	0,772			d	-1.460		
																	q	3	

Tabela C23. Equações de repetibilidade em função da média "m" dos resultados do ensaio de fluência estática das três misturas, tensão de 0,7 MPa, para os três modelos recomendados pela ISO 5725-2/94, para nível de confiança de 95%. (cont.)

ndinação do trecho reto				Eq. I	Equação II										Equação III			
mistura	média	dp (s)	r	r/m	W ₀	m.W ₀	m².W ₀	r.W ₀	r.m.W ₀	W ₁	m.W ₁	m².W ₁	r.W ₁	r.m.W ₁	log m	(log m)²	log r	log m . log r
M1	0,032	0,001	0,002	0,050	382.653	12.372	400,043	618,590	20,001	0,002	0.0001	0,0000	0,0000	0,0000	-1,490	2,221	-2,791	4,160
M2	0,036	0,024	0,067	1,867	221	8	0,287	14,881	0,536	0,012	0.0004	0,0000	0,0008	0,0000	-1,444	2,084	-1,173	1,693
M3	0,042	0,009	0,026	0,621	1.495	62,281	2,595	38,662	1,611	0,029	0.0012	0,0001	0,0008	0,0000	-1,380	1,905	-1,587	2,191
			Σ	2,537	384.369	12.443	402,925	672,132	22,148	0,043	0.0017	0,0001	0,0016	0,0001	-4,314	6,210	-5,551	8,044
				0,846	(T ₁)	(T ₂)	(T ₃)	(T ₄)	(T ₅)	(T ₁)	(T ₂)	(T ₃)	(T ₄)	(T ₅)	(T ₁)	(T ₂)	(T ₃)	(T ₄)
			(b)					a ₁	-0,093				a ₂	0,208			c	12,408
								b ₁	2,938				b ₂	-4,303			d	-2.622
																	q	3

Tabela C24. Equações da repetibilidade "r" em função da média "m" dos resultados do ensaio de fluência estática das três misturas, tensão de 0,7 MPa, para os três modelos sugeridos pela ISO 5725-2/94, com nível de confiança de 95%.

parâmetro	modelo		
	r = b.m	r = a + b.m	r = c.m ^d
deformação total	r = 0,204.m	r = - 0,252 + 0,572.m	r = - 0,081.m ⁻¹³⁶
deformação recuperável	r = 0,139.m	r = - 0,221 + 0,633.m	r = 0,393.m ⁻¹⁰⁶⁵
deformação não recuperável	r = 0,559.m	r = - 0,096 + 0,941.m	r = 0,256.m ⁻⁸⁹
recuperação	r = 0,329.m	r = 41,199 - 0,347.m	r = 3,655.m ⁻³⁰⁴⁴
módulo de fluência - 3 600 s	r = 0,205.m	r = 60,243 - 0,412.m	r = 8,910.m ⁻²⁶⁷²
módulo de fluência - 4 500 s	r = 0,781.m	r = 2,452 + 0,772.m	r = - 0,131.m ⁻¹⁴⁶⁰
inclinação do trecho reto	r = 0,846.m	r = 0,208 - 4,303.m	r = 12,408.m ⁻²⁶²²

Tabela C25. Valores de repetibilidade "r" para os resultados dos ensaios de fluência estática para as três misturas, tensão de 0,7 MPa, de acordo com os modelos da ISO 5725-2/94, para nível de confiança de 95%.

mistura	M1			M2			M3		
parâmetro	r = b.m	r = a + b.m	r = c.m ^d	r = b.m	r = a + b.m	r = c.m ^d	r = b.m	r = a + b.m	r = c.m ^d
deformação total	0,130	0,113	-3,31854E+25	0,167	0,216	-73572677257	0,148	0,163	-7,57916E+17
deformação recuperável	0,058	0,044	#DIV/0!	0,061	0,058	#DIV/0!	0,068	0,089	#DIV/0!
deformação não recuperável	0,121	0,107	8,86E+58	0,210	0,258	2,58E+37	0,132	0,127	2,50E+55
recuperação	20,425	19,640	0,00	17,896	22,310	0,00	22,250	17,714	0,00
módulo de fluência - 3 600 s	22,547	15,010	0,00	17,698	24,736	0,00	19,942	20,236	0,00
módulo de fluência - 4 500 s	224,948	224,867	0,00	152,877	153,608	0,00	241,685	241,415	0,00
inclinação do trecho reto	0,027	0,068	#DIV/0!	0,030	0,053	#DIV/0!	0,035	0,028	#DIV/0!

Tabela C26. Determinação das diferenças entre resultados dos ensaios de fluência estática, tensão de 0,7 MPa, e número de diferenças maiores que o valor de repetibilidade, de acordo com os modelos da ISO 5725-2/94, para nível de confiança de 95%.

propriedade	deformação total							valor de repetibilidade		n° de diferenças acima	
mistura	diferenças entre determinações						total	modelo 1	modelo 2	modelo 1	modelo 2
M1				0,001	0,030	0,031	3	0,130	0,113	0	0
M2	0,114	0,174	0,095	0,060	0,019	0,079	6	0,167	0,216	1	0
M3	0,095	0,052		0,147			3	0,148	0,163	0	0

Tabela C26. Determinação das diferenças entre resultados dos ensaios de fluência estática, tensão de 0,7 MPa, e número de diferenças maiores que o valor de repetibilidade, de acordo com os modelos da ISO 5725-2/94, para nível de confiança de 95%. (cont.)

propriedade	deformação recuperável							valor de repetibilidade		n° de diferenças acima	
mistura	diferenças entre determinações						total	modelo 1	modelo 2	modelo 1	modelo 2
M1	0,030	0,002	0,015	0,032	0,015	0,017	6	0,058	0,044	0	0
M2	0,016	0,050	0,033	0,034	0,017	0,017	6	0,061	0,058	0	0
M3	0,063	0,029		0,034			3	0,068	0,089	0	0

propriedade	deformação não recuperável							valor de repetibilidade		n° de diferenças acima	
mistura	diferenças entre determinações						total	modelo 1	modelo 2	modelo 1	modelo 2
M1				0,033	0,015	0,048	3	0,121	0,107	0	0
M2	0,129	0,223	0,128	0,094	0,001	0,095	6	0,210	0,258	1	0
M3	0,031	0,080		0,111			3	0,132	0,127	0	0

propriedade	recuperação							valor de repetibilidade		n° de diferenças acima	
mistura	diferenças entre determinações						total	modelo 1	modelo 2	modelo 1	modelo 2
M1	17,500	12,500	18,420	5,000	0,920	5,920	6	20,425	19,640	0	0
M2	10,590	18,010	11,500	7,420	0,910	6,510	6	17,896	22,310	1	0
M3	0,270	9,370		9,100			3	22,250	17,714	0	0

propriedade	M _F (MPa) - 3 600 s							valor de repetibilidade		n° de diferenças acima	
mistura	diferenças entre determinações						total	modelo 1	modelo 2	modelo 1	modelo 2
M1				0,170	5,320	5,490	3	22,547	15,010	0	0
M2	13,200	18,820	11,290	5,620	1,910	7,530	6	17,698	24,736	1	0
M3	11,590	7,700		19,290			3	19,942	20,236	0	0

Tabela C26. Determinação das diferenças entre resultados dos ensaios de fluência estática, tensão de 0,7 MPa e número de diferenças maiores que o valor de repetibilidade, de acordo com os modelos da ISO 5725-2/94, para nível de confiança de 95%. (cont.)

propriedade	M _F (MPa) - 4 500 s							valor de repetibilidade		n° de diferenças acima	
mistura	diferenças entre determinações						total	modelo 1	modelo 2	modelo 1	modelo 2
M1	160,570	115,730	187,130	44,840	26,560	71,400	6	224,948	224,867	0	0
M2	91,290	126,930	90,710	35,640	0,580	36,220	6	152,877	153,608	0	0
M3	30,770	128,420		159,190			3	241,685	241,415	0	0

propriedade	inclinação do trecho reto							valor de repetibilidade		n° de diferenças acima	
mistura	diferenças entre determinações						total	modelo 1	modelo 2	modelo 1	modelo 2
M1	0,001	0,001		0,000			3	0,027	0,068	0	0
M2	0,016	0,032	0,032	0,048	0,048	0,000	6	0,030	0,053	4	0
M3	0,000	0,016		0,016			3	0,035	0,028	0	0

Os valores de probabilidade de ocorrência de valores menores ou iguais ao valor de repetibilidade apropriado, para o ensaio de fluência estática com tensão de 0,7 MPa, estão indicados na Tabela 5.21, no Capítulo 5 (pág. 170).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADEDIMILA, A.S.; KENNEDY, T.W. (1976). Effects of repeated tensile stresses on the resilient properties of asphalt mixtures. *Transportation Research Record*, n.464, p.85-88.

AL-ABDUL WAHHAB, H.I. et al. (1995). National study of asphalt pavement rutting in Saudi Arabia. *Transportation Research Record*, n.1473, p.35-42.

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. 147 p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS (1994). *TP31-94 (provisional) - Standard test method for determining the resilient modulus of bituminous mixtures by indirect tension*. Washington.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (1982). *ASTM D 4123/82 – Standard method of indirect tension test for resilient modulus of bituminous mixtures*. Philadelphia.

ANANI, B.A. et al. (1990). Laboratory and field study of pavement rutting in Saudi Arabia. *Transportation Research Record*, n.1259, p.79-90.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1993). *NBR 12891 – Dosagem de misturas betuminosas pelo método Marshall*. Rio de Janeiro.

ASSOCIATION FRANÇAISE DE NORMALISATION (1999). *NFP 98-130 - Couches de roulement et couches de liaison: bétons bitumineux semi-grenus (BBSG)*. França.

- AYRES, M.; WITCZAK, M.W. (1995). Resilient modulus properties of asphalt rubber mixes from field demonstration projects in Maryland. *Transportation Research Record*, n.1492, p.96-107.
- BOUDREAU, R.L. et al. (1992). Effects of test parameters on resilient modulus of laboratory-compacted asphalt concrete specimens. *Transportation Research Record*, n.1353, p.46-52.
- BROWN, D.R. et al. (1997). Georgia's experience with crumb rubber in hot-mix asphalt. *Transportation Research Record*, n.1583, p.45-51.
- CAMPOS, B.A.L. et al. (2000). Asfalto-borracha – uma novidade com 40 anos de existência! In: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 32., Brasília, 2000. *Anais*. Brasília, Associação Brasileira de Pavimentação. v.1, p.211-221.
- CARPENTER, S.H. (1993). Permanent deformation: field evaluation. *Transportation Research Record*, n.1417, p.135-143.
- CHOUBANE, B. et al. (1999). Ten-year performance evaluation of asphalt-rubber surface mixes. *Transportation Research Record*, n.1681, p.10-18.
- COELHO, V. (1996). *Contribuição ao estudo das deformações permanentes, nas condições do Brasil, em camadas de concreto asfáltico de pavimentação*. São Carlos. 281 p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- 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.
- DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM DO ESTADO DE SÃO PAULO (1991). *Manual de normas – pavimentação*. São Paulo.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM (1994). *DNER-ME 138/94 - Misturas betuminosas – determinação da resistência à tração por compressão diametral*. Rio de Janeiro.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM (1994). *DNER-ME 133/94 - Misturas betuminosas – determinação do módulo de resiliência*. Rio de Janeiro.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM (1997). *DNER-ES 313/97 - Pavimentação – concreto betuminoso*. 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*, n.1454, p.74-81.
- EPPS, J.A. (1994). Uses of recycled rubber tires in highways. NCHRP *Synthesis of Highway Practice*, n.198, p.162.
- ESTAKHRI, C.K. et al. (1992). Use, availability, and cost-effectiveness of asphalt rubber in Texas. *Transportation Research Record*, n.1339, p.30-37.
- FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION (1997). *Hot-mix bituminous paving manual*. Washington, DC, Office of Engineering. /FHWA-PD-97-027/.
- 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.
- HANSON, D.I. et al. (1994). Evaluation and characterization of a rubber-modified hot mix asphalt pavement. *Transportation Research Record*, n.1436, p.98-107.
- HEITZMAN, M. (1992). Design and construction of asphalt paving materials with crumb rubber modified. *Transportation Research Record*, n.1339, p.1-8.
- HICKS, R.G.; EPPS, J.A. (2000). Life cycle for asphalt-rubber paving materials. In: ASPHALT RUBBER 2000 CONFERENCE, Vilamoura, 2000. *Proceedings*. Braga, Barbosa & Xavier. p.569-589.
- HILLS, J.F. (1973). The creep of asphalt concrete mixes. *Journal of the Institute of Petroleum*, v.59, n.570, p.247-262.
- HOWEEDY, M.F.; HERRIN, M. (1972). Behavior of cold mixes under repeated compressive loads. *Transportation Research Record*, n.404, p.57-70.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE PETRÓLEO. Comissão de asfalto. (1994). *Informadores básicas sobre materiais asfálticos*. 5.ed.rev. Rio de Janeiro.
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (1986). *Precision of test methods – determination of repeatability and reproducibility for a standard test method by inter-laboratory tests*. 2.ed. Switzerland.
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (1994). *Accuracy (trueness and precision) of measurement methods and results – part 2: basic method for the determination of repeatability and reproducibility of a standard measurement method*. Switzerland.

- JIMENEZ, R.A. (1982). Laboratory measurements of asphalt-rubber concrete mixtures. *Transportation Research Record*, n.843, p.4-11.
- JIMENEZ, R.A. (1993). Asphalt: mixture design method to minimize rutting. *Transportation Research Record*, n.1417, p.109-116.
- KHEDAYWI, T.S. et al. (1993). Laboratory investigation of properties of asphalt-rubber concrete mixtures. *Transportation Research Record*, n.1417, p.93-98.
- KRUTZ, N.C.; STROUP-GARDINER, M. (1992). Permanent deformation characteristics of recycled tire rubber-modified and unmodified asphalt concrete mixtures. *Transportation Research Record*, n.1339, p.38-44.
- LAI, J.S. (1976). Predicting permanent deformation of asphalt concrete from creep tests. *Transportation Research Record*, n.616, p.41-43.
- 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. et al. (2000). Mechanical behavior of asphalt rubber mixes prepared in laboratory. In: ASPHALT RUBBER 2000 CONFERENCE, Vilamoura, 2000. *Proceedings*. Braga, Barbosa & Xavier. p.309-318.
- LITTLE, D.N. et al. (1993). Development of criteria to evaluate uniaxial creep data and asphalt concrete permanent deformation potential. *Transportation Research Record*, n.1417, p.49-57.
- MAHBOUB, K. (1990). Asphalt concrete creep as related to rutting. *Journal of Materials in Civil Engineering*, v.2, n.3, p.147-163.
- MAHBOUB, K.; LITTLE, D.N. (1990). Overview of a rational asphalt concrete mixture design for Texas. *Transportation Research Record*, n.1269, p.125-132.
- MAUPIN, G.W. (1992). Virginia's experimentation with asphalt rubber concrete. *Transportation Research Record*, n.1339, p.9-15.
- McQUILLEN JR., J.L. et al. (1988). Economic analysis of rubber-modified asphalt mixes. *Journal of Transportation Engineering*, v.114, n.3, May, p.259-277.
- MERIGHI, J.V. (1999). *Estudo da deformação permanente de misturas asfálticas em ensaios de laboratório*. São Paulo. 255 p. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.

- MOTTA, L.M.G.; PINTO, S. (1994). O uso de ensaios estáticos e dinâmicos na definição de parâmetros de comportamento das misturas asfálticas. In: ENCONTRO DE ASFALTO, 12., Rio de Janeiro, 1994. *Anais*. Rio de Janeiro, Instituto Brasileiro do Petróleo. p.152-178.
- 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.
- OTENG-SEIFAH, S.; MANKE, P.G. (1976). Study of rutting in flexible highway pavements in Oklahoma. *Transportation Research Record*, n.602, p.97-99.
- PETROBRAS DISTRIBUIDORA S.A. Setor de Suporte Técnico da Gerência de Grandes Consumidores. (1996). *Manual de serviços de pavimentação*. Rio de Janeiro.
- PINTO, S.; PREUSSLER, E.S. (1980). Módulos resilientes de concretos asfálticos. In: ENCONTRO DE ASFALTO, 5., Rio de Janeiro, 1980. *Anais*. Rio de Janeiro, Instituto Brasileiro do Petróleo.
- QUEIROZ, C.A.V.; VISSER, A.T. (1978). Uma investigação dos módulos de resiliência de revestimentos betuminosos brasileiros. In: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 14., João Pessoa, 1978. *Anais*. João Pessoa, Associação Brasileira de Pavimentação. p.353-387.
- ROBERTS, F.L. et al. (1998). *Hot mix asphalt materials, mixture design and construction*. Lanham, NAPA Educacional Foundation.
- ROBERTS, F.L.; LYTTON, R.L. (1987). FAA mixture design procedure for asphalt-rubber concrete. *Transportation Research Record*, n.1115, p.216-225.
- ROCHA FILHO, M.F. (2001) *Vai começar a reciclagem de pneus no país*. <http://www.estadao.com.br/ciencia/noticias/2001/dez/12/61.htm>. (12.dez.).
- RUWER, P. et al. (2001). Aplicação de concreto asfáltico com borracha no trecho Guaíba-Camaquã da rodovia BR 116/RS. In: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 33., Florianópolis, 2001. *Anais*. Florianópolis, Associação Brasileira de Pavimentação. p.1323-1332.
- SÁ, M.F.P.; MOTTA, L.M.G. (1996). Utilização de ensaios de creep estático e dinâmico para caracterização de misturas asfálticas. In: ENCONTRO DE ASFALTO, 13., Rio de Janeiro, 1996. *Anais*. Rio de Janeiro, Instituto Brasileiro do Petróleo. v.1, p.91-115.

- SCHARF, R. (1999). *Indústria terá que garantir destino de pilhas e pneus*. <http://www.membro.intermega.globo.com/ecoturismo/ecologia.htm> (21.set.).
- SCHMIDT, R.J. (1972). A practical method for measuring the resilient modulus of asphalt-treated mixes. *Highway Research Record*, n.404, p.22-32.
- SILVEIRA, M.A. (1999). *Efeitos da adição de polímeros em areia-asfalto a frio*. São Carlos. 99 p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- STEPHENS, J.E. (1982). Field evaluation of rubber-modified bituminous concrete. *Transportation Research Record*, n.843, p.11-21.
- TAIRA, C. (2001). *Avaliação do desempenho em laboratório de misturas asfálticas densa utilizando asfalto convencional (CAP-20) e asfalto modificado com polímero SBS (BETUFLEX B 65/60)*. São Carlos. 147 p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- TAKALLOU, H.B.; SAINTON, A. (1992). Advances in technology of asphalt paving materials containing used tire rubber. *Transportation Research Record*, n.1339, p.23-29.
- TAKALLOU, M.B.; TAKALLOU, H.B. (1991). Benefits of recycling waste tires in rubber asphalt paving. *Transportation Research Record*, n.1310, p.87-92.
- THE SHELL bitumen handbook (1991). United Hingdom, Shell Bitumen.
- TOMMAZINI, G. (2000). *Pneus: desafio da reciclagem*. <http://www.autoesporte.globo.com> (21.set.).
- VAN DER LOO, P.J. (1978). The creep test, a key tool in asphalt mix evaluation and in prediction of rutting. *Proceedings Association of Asphalt Paving Technologists (AAPT)*, v. 47, p. 522-557.
- VAN KIRK, J.; HOLLERAN, G. (2000) Reduced thickness asphalt rubber concrete leads to cost effective pavement rehabilitation. In: ASPHALT RUBBER 2000 CONFERENCE, Vilamoura, 2000. *Proceedings*. Braga, Barbosa & Xavier. p.591-603.
- WEST, R.C. et al. (1998). Effect of tire rubber grinding method on asphalt-rubber binder characteristics. *Transportation Research Record*, n.1638, p.134-140.

APÊNDICES

Apêndice A Síntese da ISO 5725-2/94: *Precision of test methods – determination of repeatability and reproducibility for a standard test method by inter-laboratory tests.*

Apêndice B Leis ambientais sobre pneus inservíveis:

- Resolução nº 258, Conselho Nacional do Meio Ambiente, de 26 de Agosto de 1999;
- ISTEA – Intermodal Surface Transportation Efficiency Act, de 18 de Dezembro de 1991.

APÊNDICE A

Síntese da ISO 5725-2/94: *Precision of test methods – determination of repeatability and reproducibility for a standard test method by inter-laboratory tests.*

Medidas de precisão em ensaios de laboratório

O conteúdo deste capítulo se refere ao método para a determinação da repetibilidade e da reprodutibilidade de ensaios de laboratório proposto pela ISO 5725, com enfoque na determinação da repetibilidade.

A parte introdutória, composta pelas principais definições e conceitos gerais, foi extraída da ISO 5725/1986. A segunda parte, referente à análise estatística, está baseada na ISO 5725-1/1994, embora a abordagem estatística seja praticamente idêntica em ambas as versões.

C.1. Introdução

Segundo a ISO 5725/1986, ensaios efetuados com materiais com propriedades presumivelmente iguais, em circunstâncias julgadas iguais não fornecem, em geral, resultados idênticos. Isto se deve a erros aleatórios inevitáveis que são inerentes a cada método de ensaio; os fatores que podem influenciar os resultados não podem ser completamente controlados e esta variabilidade deve ser considerada na interpretação dos dados obtidos em um ensaio. A comparação dos resultados de ensaios de duas baterias de corpos-de-prova não indicará uma diferença qualitativa se a diferença entre eles puder ser atribuída à variabilidade inerente ao método de ensaio adotado.

Muitos são os fatores (excluídas as variações entre corpos-de-prova supostamente idênticos) que podem contribuir para a variabilidade dos resultados de um ensaio, incluindo os seguintes:

- o operador;
- o equipamento utilizado;
- a calibração do equipamento;
- o ambiente, representado por fatores como temperatura, umidade, poluição do ar e outros.

A variabilidade entre ensaios realizados por operadores diferentes e/ou utilizando equipamentos diferentes será, freqüentemente, maior que entre ensaios efetuados por um único operador usando o mesmo equipamento.

Precisão é um termo genérico relacionado com a variabilidade dos resultados de ensaios de laboratório (ISO 5725/1986). A ISO 5725/1994 define precisão como a proximidade entre os resultados de um determinado ensaio. Duas medidas de precisão, denominadas “repetibilidade” e “reprodutibilidade”, foram definidas e, para a maioria dos casos, são suficientes para descrever a variabilidade de um método de ensaio.

A repetibilidade está relacionada à realização de ensaios sob condições que devem permanecer o mais constante possível; os ensaios devem estar sendo realizados durante um pequeno intervalo de tempo em um laboratório, por um mesmo operador, usando o mesmo equipamento.

A reprodutibilidade se refere à variabilidade ensaios realizados sob condições diferentes, em laboratórios diferentes, com diferentes operadores, utilizando equipamentos diferentes.

Sob condições de repetibilidade, os quatro fatores anteriormente listados são considerados constantes e não contribuem para a variabilidade, enquanto que sob condições de reprodutibilidade, eles são variáveis e contribuem para a variabilidade dos resultados dos ensaios. Então, repetibilidade e reprodutibilidade são dois extremos, o primeiro medindo a mínima e o segundo a máxima variabilidade nos resultados obtidos a partir de um ensaio padronizado.

C.2. Princípios gerais

C.2.1. Definições quantitativas de repetibilidade e reprodutibilidade para métodos de ensaio padronizados

Repetibilidade é o grau de aproximação entre resultados de ensaios mutuamente independentes obtidos sob condições de repetibilidade. Estas são condições nas quais os resultados de ensaios mutuamente independentes são obtidos através do mes-

mo método, a partir de materiais idênticos, nas mesmas condições de laboratório, pelo mesmo operador utilizando o mesmo equipamento, considerando-se pequenos intervalos de tempo.

Valor de repetibilidade (r) é o valor abaixo do qual a diferença absoluta entre dois resultados de ensaios obtidos sob condições de repetibilidade pode ser encontrada, com uma probabilidade de 95%.

Reprodutibilidade representa o grau de aproximação entre resultados de ensaios obtidos sob condições de reprodutibilidade. Nestas condições, os resultados dos ensaios são obtidos empregando o mesmo método de ensaio, com corpos-de-prova idênticos, em laboratórios diferentes, com operadores diferentes, utilizando equipamentos diferentes.

O valor de reprodutibilidade (R) corresponde ao valor abaixo do qual a diferença absoluta entre dois resultados de ensaio obtidos sob condições de reprodutibilidade pode ser encontrada, com uma probabilidade de 95%.

As definições de repetibilidade e reprodutibilidade, como são apresentadas nesta norma, representam, em primeiro lugar, um critério para julgar se a diferença entre os resultados de dois ensaios pode ser atribuída a flutuações aleatórias; uma diferença maior que " r " ou " R " é suspeita e pode justificar a conclusão que existe uma diferença sistemática entre os resultados ou pode levar a alguma investigação adicional. Neste sentido " r " ou " R " podem ser denominados "diferenças críticas", para serem aplicadas a um par de resultados de ensaios obtidos sob condições de repetibilidade e reprodutibilidade, respectivamente.

As definições de valor de repetibilidade e de valor de reprodutibilidade são referentes a constantes teóricas que, na realidade, permanecem desconhecidas. Os valores de " r " e " R " determinadas a partir de experimentos ditos "precisos" são, em termos estatísticos, estimativas dessas constantes e, como tal, estão sujeitas a erros. Consequentemente, os níveis de probabilidade associados com " r " ou " R " não serão exatamente 95%, mas apenas da ordem de 95%, e isto será verdadeiro para outras diferenças críticas derivadas destas. Isto é inevitável, mas não prejudica seriamente seus valores práticos, uma vez que eles são primariamente designados para servir como ferramentas de julgamento, definindo se a diferença entre os resultados pode ser atribuída a incertezas inerentes ao método de ensaio ou não.

Os valores de “r” e “R”, uma vez determinados, podem ser empregados em muitos casos, como por exemplo:

- para verificar se a técnica experimental de um laboratório é inferior à técnica padrão;
- no desenvolvimento de técnicas de controle de qualidade;
- para comparar resultados de ensaios de uma bateria de corpos-de-prova;
- no desenvolvimento de especificações, em primeiro lugar para assegurar que a conformidade é comprovada pelo método de ensaio;
- na comparação de resultados de ensaios com a mesma bateria de corpos-de-prova selecionados por um fornecedor e por um consumidor;
- na avaliação da adequação de métodos de ensaio concorrentes.

C.3. Modelo estatístico

Para a estimativa da precisão de um método de ensaio é usual assumir que cada resultado de ensaio (y) seja o somatório de três componentes, isto é:

$$y = m + B + e \quad (C.1)$$

onde, para um material em particular:

m = média geral;

B = desvio de um laboratório com relação à média geral;

e = erro aleatório que ocorre em cada ensaio.

Outros modelos são usados em algumas ocasiões específicas, porém, o modelo acima irá cobrir a maioria dos casos.

A média geral “m” de um material ensaiado é chamada “nível de adequação do ensaio”; corpos-de-prova de diferentes purezas de um produto químico ou materiais diferentes (p. ex., tipos diferentes de aço) irão corresponder a diferentes níveis. Em

muitas situações técnicas, o nível de adequação do ensaio é exclusivamente definido pelo método de ensaio e a noção de um valor real independente não se aplica. Contudo, em algumas situações, o conceito de um valor real “ μ ” para a adequação do método pode parecer bom. O nível “ m ” não é necessariamente igual ao valor real “ μ ”; a diferença ($m - \mu$), quando existe, é chamada “tendência do método de ensaio”.

Quando “ r ” e “ R ” são usados para testar a diferença entre resultados de ensaios, uma tendência não terá utilidade e poderá ser ignorada. Mas quando estes critérios são usados para comparar resultados de ensaios com um valor especificado em um contrato ou em um modelo, uma tendência deverá ser considerada onde o contrato ou especificação refere-se ao valor real, “ μ ”, e não ao nível de teste, “ m ”. Se um valor real existe e é conhecido, a análise de um experimento preciso pode indicar que há uma tendência.

O termo “ B ” é considerado uma constante durante qualquer série de ensaios realizados sob condições de repetibilidade, mas considera-se que esta constante se comporte como uma variável aleatória em uma série de ensaios sob condições de reprodutibilidade. Sua variância é denominada “variância interlaboratorial” e é expressa como:

$$\text{var}(B) = \sigma_L^2 \quad (\text{C.2})$$

onde σ_L^2 inclui as variabilidades entre operadores e entre equipamentos.

Em geral “ B ” pode ser considerado o somatório tanto de componentes aleatórios como sistemáticos. Estes fatores representam, por exemplo, diferentes condições climáticas, variações dos equipamentos com relação a tolerâncias do produtor e até mesmo as técnicas de diferentes operadores, que foram treinados em lugares diferentes.

O termo “ e ” representa um erro aleatório que ocorre em todos os resultados de ensaios. Em um único laboratório sua variância é denominada variância intralaboratorial e é expressa por:

$$\text{var}(e) = \sigma_w^2 \quad (\text{C.3})$$

Pode-se esperar que σ_w^2 assumam valores distintos em laboratórios diferentes devido a diferenças tais como a habilidade dos operadores, mas esta norma considera que para um método de ensaio padronizado tais diferenças entre laboratórios deveria ser pequena e que é justificável estabelecer um valor comum da variância intralaboratorial para todos os laboratórios que usam um determinado método de ensaio. Este valor comum, definido como a média aritmética das variâncias intralaboratorial de todos os laboratórios que estão participando do experimento preciso, é chamado variância da repetibilidade e é expresso por:

$$\overline{\text{var}}(e) = \sigma_r^2 \quad (\text{C.4})$$

Quando este modelo estatístico é adotado, a repetibilidade “r” depende somente da variância da repetibilidade, enquanto a reprodutibilidade “R” depende do somatório da variância da repetibilidade e da variância interlaboratorial. Então, surgem dois parâmetros, um deles denominado desvio-padrão da repetibilidade, expresso por:

$$\sigma_r = \sqrt{\overline{\text{var}}(e)} \quad (\text{C.5})$$

e o desvio-padrão da reprodutibilidade, expresso por:

$$\sigma_R = \sqrt{\sigma_L^2 + \sigma_r^2} \quad (\text{C.6})$$

Portanto, a repetibilidade “r” é dada por:

$$r = f\sqrt{2}\sigma_r \quad (\text{C.7})$$

e a reprodutibilidade “R” é dada por:

$$R = f\sqrt{2}\sigma_R \quad (\text{C.8})$$

onde: o coeficiente $\sqrt{2}$ é devido ao fato de “r” e “R” referirem-se à diferença entre dois resultados de ensaio;

“f” é um fator que depende do número de resultados de ensaio disponível para a estimativa de cada variância e da forma da distribuição dos componentes “B” e “e”.

Se estas distribuições são aproximadamente normais e o número de resultados dos ensaios não for muito pequeno, para a probabilidade de 95%, o fator “f” nunca irá ser muito diferente do valor 2 e o uso deste valor é recomendado nesta norma, sendo o valor $f\sqrt{2}$ arredondado para 2,8.

Na prática, como os valores exatos do desvio-padrão da repetibilidade e o desvio-padrão da reprodutibilidade são desconhecidos, eles podem ser substituídos pelas suas estimativas “s”, resultando em:

$$r = 2,8s_r \quad (C.9)$$

$$R = 2,8s_R \quad (C.10)$$

O modelo estatístico apresentado na equação (C.1) é uma aproximação que, devido à extensiva experiência, é sabidamente satisfatório para situações da prática como uma hipótese de trabalho para planejamento de experimentos e análise de dados.

C.3.1. Planejamento de um experimento preciso

Uma configuração possível é: amostras de “q” baterias de um determinado material, representando “q” níveis diferentes do ensaio são enviadas para “p” laboratórios, cada qual efetuando “n” ensaios sob condições de repetibilidade para cada nível. Estes ensaios são realizados com material idêntico. Este tipo de experimento é denominado “experimento de nível uniforme”.

Uma alternativa é o “experimento em níveis diferentes”. Cada nível é separado em dois subníveis, “a” e “b”, os quais são ligeiramente diferentes. Cada laboratório recebe uma amostra de cada um destes subníveis para ensaio.

C.4. Análise estatística dos resultados de um experimento interlaboratorial

C.4.1. Considerações preliminares

O cálculo da repetibilidade “r” e da reprodutibilidade “R” é feito, para cada nível separadamente, a partir dos dados remanescentes depois de efetivada a eliminação de valores admitidos como errados ou inadequados (“outliers”). Tais erros podem ser atribuídos a algum tipo de descuido na efetuação do ensaio, a erros de cálculo, a erros de transcrição de resultados ou à análise de amostras erradas.

C.4.2. Relação entre os valores de precisão e a média “m”

Para a avaliação da repetibilidade, conforme definição apresentada no item C.2.1, é necessário efetuar um experimento controlado, no qual sejam realizados pelo menos dois ensaios ($n = 2$) por amostra (nível), para um mínimo de duas amostras diferentes, sob condições de repetibilidade. A este respeito, ver item C.4.3, no qual é apresentado o cálculo da probabilidade de ocorrerem diferenças menores ou iguais ao valor de repetibilidade.

Não se pode dar por certo que exista uma relação regular entre “r” (ou “R”) e “m”. Particularmente, quando a heterogeneidade do material é parte inseparável da variabilidade dos resultados do ensaio, haverá apenas uma relação se a heterogeneidade for uma função regular de “m”. No caso de materiais sólidos de composições diferentes e originários de processos de produção diferentes, uma relação regular não é certa, de modo algum. Alternativamente, valores separados de “r” e “R” deveriam ser estabelecidos para cada material estudado.

A ISO 5725/1986 considera apenas três tipos de relação, sejam elas:

- equação I (uma reta passando pela origem):

$$r = bm \quad (C.11)$$

- equação II (uma reta com intercepto positivo):

$$r = a + bm \quad (\text{C.12})$$

- equação III (uma exponencial):

$$\log r = c + d \log m \text{ (ou } r = Cm^d \text{): } d < 1 \quad (\text{C.13})$$

No caso das equações (C.11) e (C.12), do ponto de vista estatístico, o ajuste por uma linha reta é complicado, devido ao fato de que “m” ou “r” são valores estimados e, portanto, sujeitos a erros. Contudo, como o coeficiente angular “b” é normalmente pequeno (da ordem de 0,1 para menos), então erros no valor de “m” tem pequena influência e os erros na estimativa de “r” tem maior influência no resultado.

Uma boa estimativa dos parâmetros dessa regressão linear requer uma regressão ponderada. A ISO 5725/1994 sugere o procedimento a seguir, o qual é considerado satisfatório para aplicações práticas. Com pesos W_j iguais a $1/r_{Mj}^2$, onde $M = 0, 1, 2, \dots$, para iterações sucessivas, as fórmulas são:

$$T_1 = \sum_j W_j \quad (\text{C.14})$$

$$T_2 = \sum_j m_j W_j \quad (\text{C.15})$$

$$T_3 = \sum_j W_j m_j^2 \quad (\text{C.16})$$

$$T_4 = \sum_j W_j r_j \quad (\text{C.17})$$

$$T_5 = \sum_j W_j r_j m_j \quad (\text{C.18})$$

O cálculo de T_1 a T_5 é feito a partir dos pesos W_{0j} , conforme a expressão:

$$W_{0j} = \frac{1}{r_{0j}^2}, j = 1, 2, \dots, q \text{ e } r_0 = 2,8s \quad (C.19)$$

Isto leva a: $r_1 = a_1 + b_1 m_1$ ou $r_{1j} = a_1 + b_1 m_j$

Os cálculos são então repetidos com

$$W_{1j} = \frac{1}{r_{1j}^2} \quad (C.20)$$

que resulta: $r_2 = a_2 + b_2 m$.

Este procedimento poderia ser repetido com pesos $W_{2j} = 1/r_{2j}^2$, mas isto não irá provocar mudanças consideráveis. Os dois passos apresentados anteriormente são suficientes para eliminar erros grosseiros nos pesos e a equação para r_2 pode ser considerada como o resultado final.

Para a equação (C.11), o valor de “b” é dado por:

$$b = \frac{T_5}{T_3} \quad (C.21)$$

E uma substituição algébrica para os pesos resulta: $b = \frac{T_5}{T_3}$

$$b = \frac{\sum_j \frac{r_j}{m_j}}{q} \quad (C.22)$$

Na equação (C.12) os valores de “a” e “b” são dados por:

$$a = \frac{T_4 T_3 - T_2 T_5}{T_1 T_3 - T_2^2} \quad (C.23)$$

e

$$b = \frac{T_1 T_5 - T_2 T_4}{T_1 T_3 - T_2^2} \quad (C.24)$$

Para a equação (C.13), as fórmulas são:

$$T_1 = \sum_j \log m_j \quad (C.25)$$

$$T_2 = \sum (\log m_j)^2 \quad (C.26)$$

$$T_3 = \sum_j \log r_j \quad (C.27)$$

$$T_4 = \sum_j (\log m_j)(\log r_j) \quad (C.28)$$

e então

$$c = \frac{T_2 T_3 - T_1 T_4}{q T_2 - T_1^2} \quad (C.29)$$

e

$$d = \frac{q T_4 - T_1 T_3}{q T_2 - T_1^2} \quad (C.30)$$

C.4.3. Cálculo da probabilidade

A probabilidade de ocorrerem diferenças menores ou iguais ao valor de repetibilidade é calculada como apresentado a seguir:

- para cada amostra, calcula-se o número de diferenças possíveis “ N_j ” entre dois resultados de ensaio através da fórmula:

$$N_j = \frac{n_j(n_j - 1)}{2}, \text{ onde “n” é o número de resultados da amostra “j”}. \quad (\text{C.31})$$

- calcula-se o número total de diferenças para o conjunto de amostras:

$$N = \sum_{j=1}^q N_j \quad (\text{C.32})$$

- obtidas as N diferenças possíveis, conta-se o número de diferenças maiores que o valor de repetibilidade (“ r ”) correspondente ao nível “ j ”.

A probabilidade “ P ”, de ocorrência de diferenças menores ou iguais a “ r ” é:

$$P = \left(1 - \frac{\text{número de diferenças que extrapolam}}{N} \right) \cdot 100 \quad (\text{C.33})$$

Os resultados do ensaio são considerados repetíveis se a probabilidade “ P ” encontrada é maior ou igual ao nível de confiança adotado. Este valor é escolhido em função do nível de precisão que se impõe à análise; na grande maioria dos casos, é admitido igual a 95%.

As diferenças críticas para outros níveis de probabilidade que não 95% podem ser obtidas efetuando a multiplicação das diferenças críticas para o nível de 95% pelos fatores correspondentes aos níveis de probabilidade apresentados na Tabela 1. Estes fatores são válidos apenas quando a distribuição dos componentes “ B ” e “ e ” do modelo estatístico é normal ou aproximadamente normal.

Tabela 1. Fatores de multiplicação para níveis de probabilidade diferentes de 95%. [Fonte: ISO 5725/1986]

probabilidade (%)	fator
90,0	0,82
95,0	1,00
98,0	1,16
99,0	1,29
99,5	1,40

APÊNDICE B

Leis ambientais sobre pneus inservíveis

- Resolução nº 258, Conselho Nacional do Meio Ambiente, de 26 de Agosto de 1999.
- ISTEA – Intermodal Surface Transportation Efficiency Act, de 18 de Dezembro de 1991.

RESOLUÇÃO Nº 258, DE 26 DE AGOSTO DE 1999

[Obtido do "site": <http://www.mma.gov.br/port/conama/> em Fevereiro de 2002.]

O CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE-CONAMA, no uso das atribuições que lhe são conferidas pela Lei nº 6.938, de 31 de agosto de 1981, regulamentada pelo Decreto nº 99.274, de 6 de junho de 1990 e suas alterações, tendo em vista o disposto em seu Regimento Interno, e

Considerando que os pneumáticos inservíveis abandonados ou dispostos inadequadamente constituem passivo ambiental, que resulta em sério risco ao meio ambiente e à saúde pública;

Considerando que não há possibilidade de reaproveitamento desses pneumáticos inservíveis para uso veicular e nem para processos de reforma, tais como recapagem, recauchutagem e remoldagem;

Considerando que uma parte dos pneumáticos novos, depois de usados, pode ser utilizada como matéria prima em processos de reciclagem;

Considerando a necessidade de dar destinação final, de forma ambientalmente adequada e segura, aos pneumáticos inservíveis, resolve:

Art.1º As empresas fabricantes e as importadoras de pneumáticos ficam obrigadas a coletar e dar destinação final, ambientalmente adequada, aos pneus inservíveis existentes no território nacional, na proporção definida nesta Resolução relativamente às quantidades fabricadas e/ou importadas.

Parágrafo único. As empresas que realizam processos de reforma ou de destinação final ambientalmente adequada de pneumáticos ficam dispensadas de atender ao disposto neste artigo, exclusivamente no que se refere a utilização dos quantitativos de pneumáticos coletados no território nacional.

Art. 2º Para os fins do disposto nesta Resolução, considera-se:

I - pneu ou pneumático: todo artefato inflável, constituído basicamente por borracha e materiais de reforço utilizados para rodagem em veículos;

II - pneu ou pneumático novo: aquele que nunca foi utilizado para rodagem sob qualquer forma, enquadrando-se, para efeito de importação, no código 4011 da Tarifa Externa Comum-TEC;

III - pneu ou pneumático reformado: todo pneumático que foi submetido a algum tipo de processo industrial com o fim específico de aumentar sua vida útil de rodagem em meios de transporte, tais como recapagem, recauchutagem ou remoldagem, enquadrando-se, para efeitos de importação, no código 4012.10 da Tarifa Externa Comum-TEC;

IV - pneu ou pneumático inservível: aquele que não mais se presta a processo de reforma que permita condição de rodagem adicional.

Art. 3º Os prazos e quantidades para coleta e destinação final, de forma ambientalmente adequada, dos pneumáticos inservíveis de que trata esta Resolução, são os seguintes:

I - a partir de 1º de janeiro de 2002: para cada quatro pneus novos fabricados no País ou pneus importados, inclusive aqueles que acompanham os veículos importados, as empresas fabricantes e as importadoras deverão dar destinação final a um pneu inservível;

II - a partir de 1º de janeiro de 2003: para cada dois pneus novos fabricados no País ou pneus importados, inclusive aqueles que acompanham os veículos importados, as empresas fabricantes e as importadoras deverão dar destinação final a um pneu inservível;

III - a partir de 1º de janeiro de 2004:

a) para cada um pneu novo fabricado no País ou pneu novo importado, inclusive aqueles que acompanham os veículos importados, as empresas fabricantes e as importadoras deverão dar destinação final a um pneu inservível;

b) para cada quatro pneus reformados importados, de qualquer tipo, as empresas importadoras deverão dar destinação final a cinco pneus inservíveis;

IV - a partir de 1º de janeiro de 2005:

a) para cada quatro pneus novos fabricados no País ou pneus novos importados, inclusive aqueles que acompanham os veículos importados, as empresas fabricantes e as importadoras deverão dar destinação final a cinco pneus inservíveis;

b) para cada três pneus reformados importados, de qualquer tipo, as empresas importadoras deverão dar destinação final a quatro pneus inservíveis.

Parágrafo único. O disposto neste artigo não se aplica aos pneumáticos exportados ou aos que equipam veículos exportados pelo País.

Art. 4º No quinto ano de vigência desta Resolução, o CONAMA, após avaliação a ser procedida pelo Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis - IBAMA, reavaliará as normas e procedimentos estabelecidos nesta Resolução.

Art. 5º O IBAMA poderá adotar, para efeito de fiscalização e controle, a equivalência em peso dos pneumáticos inservíveis.

Art. 6º As empresas importadoras deverão, a partir de 1º de janeiro de 2002, comprovar junto ao IBAMA, previamente aos embarques no exterior, a destinação final, de forma ambientalmente adequada, das quantidades de pneus inservíveis estabelecidas no art. 3º desta Resolução, correspondentes às quantidades a serem importadas, para efeitos de liberação de importação junto ao Departamento de Operações de Comércio Exterior- DECEX, do Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior.

Art. 7º As empresas fabricantes de pneumáticos deverão, a partir de 1º de janeiro de 2002, comprovar junto ao IBAMA, anualmente, a destinação final, de forma ambientalmente adequada, das quantidades de pneus inservíveis estabelecidas no art. 3º desta Resolução, correspondentes às quantidades fabricadas.

Art. 8º Os fabricantes e os importadores de pneumáticos poderão efetuar a destinação final, de forma ambientalmente adequada, dos pneus inservíveis de sua responsabilidade, em instalações próprias ou mediante contratação de serviços especializados de terceiros.

Parágrafo único. As instalações para o processamento de pneus inservíveis e a destinação final deverão atender ao disposto na legislação ambiental em vigor, inclusive no que se refere ao licenciamento ambiental.

Art. 9º A partir da data de publicação desta Resolução fica proibida a destinação final inadequada de pneumáticos inservíveis, tais como a disposição em aterros sanitários, mar, rios, lagos ou riachos, terrenos baldios ou alagadiços, e queima a céu aberto.

Art. 10. Os fabricantes e os importadores poderão criar centrais de recepção de pneus inservíveis, a serem localizadas e instaladas de acordo com as normas ambientais e demais normas vigentes, para armazenamento temporário e posterior destinação final ambientalmente segura e adequada.

Art. 11. Os distribuidores, os revendedores e os consumidores finais de pneus, em articulação com os fabricantes, importadores e Poder Público, deverão colaborar na adoção de procedimentos, visando implementar a coleta dos pneus inservíveis existentes no País.

Art. 12. O não cumprimento do disposto nesta Resolução implicará as sanções estabelecidas na Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998, regulamentada pelo Decreto nº 3.179, de 21 de setembro de 1999.

Art. 13. Esta Resolução entra em vigor na data de sua publicação.

Section 1038 of Intermodal Surface Transportation Efficiency Act

Public Law 102-240, Dec. 18, 1991.

[Obtido, em Fevereiro de 2002, do "site":

<http://thomas.loc.gov/cgi-bin/query/D?c102:1:./temp/~c102Pxo3fs:e248004:>]

SEC. 1038. USE OF RECYCLED PAVING MATERIAL.

(a) ASPHALT PAVEMENT CONTAINING RECYCLED RUBBER DEMONSTRATION PROGRAM- Notwithstanding any other provision of title 23, United States Code, or regulation or policy of the Department of Transportation, the Secretary (or a State acting as the Department's agent) may not disapprove a highway project under chapter 1 of title 23, United States Code, on the ground that the project includes the use of asphalt pavement containing recycled rubber. Under this subsection, a patented application process for recycled rubber shall be eligible for approval under the same conditions that an unpatented process is eligible for approval.

(b) STUDIES-

(1) IN GENERAL- The Secretary and the Administrator of the Environmental Protection Agency shall coordinate and conduct, in cooperation with the States, a study to determine--

(A) the threat to human health and the environment associated with the production and use of asphalt pavement containing recycled rubber;

(B) the degree to which asphalt pavement containing recycled rubber can be recycled; and

(C) the performance of the asphalt pavement containing recycled rubber under various climate and use conditions.

(2) DIVISION OF RESPONSIBILITIES- The Administrator shall conduct the part of the study relating to paragraph (1)(A) and the Secretary shall conduct the part of the study relating to paragraph (1)(C). The Administrator and the Secretary shall jointly conduct the study relating to paragraph (1)(B).

(3) ADDITIONAL STUDY- The Secretary and the Administrator, in cooperation with the States, shall jointly conduct a study to determine the economic savings, technical performance qualities, threats to human health and the environment, and environmental benefits of using recy-

cluded materials in highway devices and appurtenances and highway projects, including asphalt containing over 80 percent reclaimed asphalt, asphalt containing recycled glass, and asphalt containing recycled plastic.

(4) **ADDITIONAL ELEMENTS-** In conducting the study under paragraph (3), the Secretary and the Administrator shall examine utilization of various technologies by States and shall examine the current practices of all States relating to the reuse and disposal of materials used in federally assisted highway projects.

(5) **REPORT-** Not later than 18 months after the date of the enactment of this Act, the Secretary and the Administrator shall transmit to Congress a report on the results of the studies conducted under this subsection, including a detailed analysis of the economic savings and technical performance qualities of using such recycled materials in federally assisted highway projects and the environmental benefits of using such recycled materials in such highway projects in terms of reducing air emissions, conserving natural resources, and reducing disposal of the materials in landfills.

(c) **DOT GUIDANCE-**

(1) **INFORMATION GATHERING AND DISTRIBUTION-** The Secretary shall gather information and recommendations concerning the use of asphalt containing recycled rubber in highway projects from those States that have extensively evaluated and experimented with the use of such asphalt and implemented such projects and shall make available such information and recommendations on the use of such asphalt to those States which indicate an interest in the use of such asphalt.

(2) **ENCOURAGEMENT OF USE-** The Secretary should encourage the use of recycled materials determined to be appropriate by the studies pursuant to subsection (b) in federally assisted highway projects. Procuring agencies shall comply with all applicable guidelines or regulations issued by the Administrator of the Environmental Protection Agency.

(d) **USE OF ASPHALT PAVEMENT CONTAINING RECYCLED RUBBER-**

(1) **STATE CERTIFICATION-** Beginning on January 1, 1995, and annually thereafter, each State shall certify to the Secretary that such State has satisfied the minimum utilization requirement for asphalt pavement containing recycled rubber established by this section. The minimum utilization requirement for asphalt pavement containing recycled rubber as a percentage of the total tons of asphalt laid in such State and financed in whole or part by any assistance pursuant to title 23, United States Code, shall be--

(A) 5 percent for the year 1994;

(B) 10 percent for the year 1995;

(C) 15 percent for the year 1996; and

(D) 20 percent for the year 1997 and each year thereafter.

(2) OTHER MATERIALS- Any recycled material or materials determined to be appropriate by the studies under subsection (b) may be substituted for recycled rubber under the minimum utilization requirement of paragraph (1) up to 5 percent.

(3) INCREASE- The Secretary may increase the minimum utilization requirement of paragraph (1) for asphalt pavement containing recycled rubber to be used in federally assisted highway projects to the extent it is technologically and economically feasible to do so and if an increase is appropriate to assure markets for the reuse and recycling of scrap tires. The minimum utilization requirement for asphalt pavement containing recycled rubber may not be met by any use or technique found to be unsuitable for use in highway projects by the studies under subsection (b).

(4) PENALTY- The Secretary shall withhold from any State that fails to make a certification under paragraph (1) for any fiscal year, a percentage of the apportionments under section 104 (other than subsection (b)(5)(A)) of title 23, United States Code, that would otherwise be apportioned to such State for such fiscal year under such section equal to the percentage utilization requirement established by paragraph (1) for such fiscal year.

(5) SECRETARIAL WAIVER- The Secretary may set aside the provisions of this subsection for any 3-year period on a determination, made in concurrence with the Administrator of the Environmental Protection Agency with respect to subparagraphs (A) and (B) of this paragraph, that there is reliable evidence indicating--

(A) that manufacture, application, or use of asphalt pavement containing recycled rubber substantially increases the threat to human health or the environment as compared to the threats associated with conventional pavement;

(B) that asphalt pavement containing recycled rubber cannot be recycled to substantially the same degree as conventional pavement; or

(C) that asphalt pavement containing recycled rubber does not perform adequately as a material for the construction or surfacing of highways and roads.

The Secretary shall consider the results of the study under subsection (b)(1) in determining whether a 3-year set-aside is appropriate.

(6) RENEWAL OF WAIVER- Any determination made to set aside the requirements of this section may be renewed for an additional 3-year period by the Secretary, with the concurrence of the Administrator with respect to the determinations made under paragraphs (5)(A) and (5)(B). Any determination made with respect to paragraph (5)(C) may be made for specific States or regions considering climate, geography, and other factors that may be unique to the State or region and that would prevent the adequate performance of asphalt pavement containing recycled rubber.

(7) INDIVIDUAL STATE REDUCTION- The Secretary shall establish a minimum utilization requirement for asphalt pavement containing recycled rubber less than the minimum utilization requirement otherwise required by paragraph (1) in a particular State, upon the request of such State and if the Secretary, with the concurrence of the Administrator of the Environmental Protection Agency, determines that there is not a sufficient quantity of scrap tires available in the State prior to disposal to meet the minimum utilization requirement established under paragraph (1) as the result of recycling and processing uses (in that State or another State), including retreading or energy recovery.

(e) DEFINITIONS- For purpose of this section--

(1) the term 'asphalt pavement containing recycled rubber' means any hot mix or spray applied binder in asphalt paving mixture that contains rubber from whole scrap tires which is used for asphalt pavement base, surface course or interlayer, or other road and highway related uses and--

(A) is a mixture of not less than 20 pounds of recycled rubber per ton of hot mix or 300 pounds of recycled rubber per ton of spray applied binder; or

(B) is any mixture of asphalt pavement and recycled rubber that is certified by a State and is approved by the Secretary, provided that the total amount of recycled rubber from whole scrap tires utilized in any year in such State shall be not less than the amount that would be utilized if all asphalt pavement containing recycled rubber laid in such State met the specifications of subparagraph (A) and subsection (d)(1); and

(2) the term 'recycled rubber' is any crumb rubber derived from processing whole scrap tires or shredded tire material taken from automobiles, trucks, or other equipment owned and operated in the United States.