

D.207

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

**AVALIAÇÃO DOS EFEITOS DO TIPO DE ASFALTO E
DA DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DO
AGREGADO NAS FLUÊNCIAS ESTÁTICA E DINÂMICA
DE MISTURAS ASFÁLTICAS DENSAS**

ANDRÉ NALETO MUGAYAR

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre em Engenharia de Transportes.

Orientador: Prof. Dr. Glauco Tulio Pessa Fabbri

São Carlos
2004

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

M951a Mugayar, André Naletto
Avaliação dos efeitos do tipo de asfalto e da
distribuição granulométrica do agregado nas fluências
estática e dinâmica de misturas asfálticas densas / André
Naletto Mugayar. -- São Carlos, 2004.

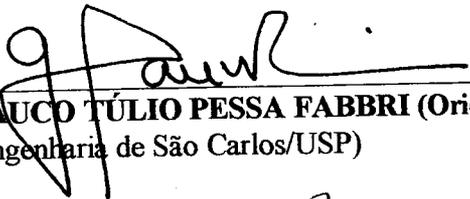
Dissertação (Mestrado) -- Escola de Engenharia de São
Carlos-Universidade de São Paulo, 2004.
Área: Engenharia de Transportes.
Orientador: Prof. Dr. Glauco Túlio Pessa Fabbri.

1. Misturas asfálticas. 2. Deformação Permanente.
3. Asfalto Modificado. 4. Fracionamento de experimentos.
I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

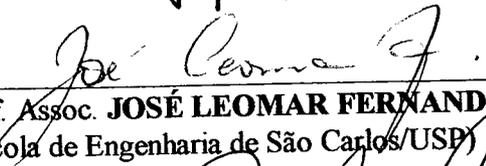
Candidato: Engenheiro **ANDRÉ NALETO MUGAYAR**

Dissertação defendida e julgada em 05-03-2004 perante a Comissão Julgadora:



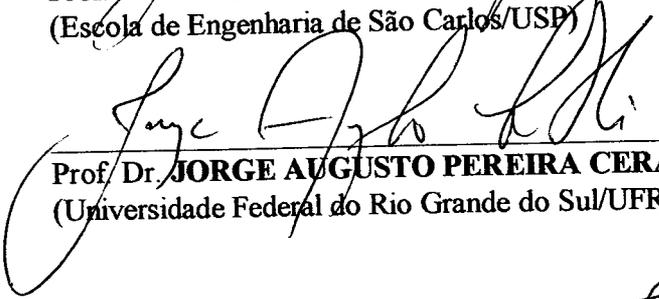
Prof. Dr. **GLAUCO TÚLIO PESSA FABBRI (Orientador)**
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP)

Aprovado



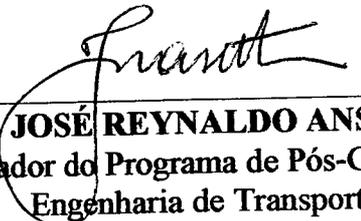
Prof. Assoc. **JOSÉ LEOMAR FERNANDES JUNIOR**
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP)

APROVADO



Prof. Dr. **JORGE AUGUSTO PEREIRA CERATTI**
(Universidade Federal do Rio Grande do Sul/UFRGS)

aprova la



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



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

Dedico este trabalho
a meu tio José Carlos,
a Juliana e a minha mãe.

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Doutor Glauco Tulio Pessa Fabbri pela orientação, dedicação, amizade e paciência durante o desenvolvimento deste trabalho;

Aos companheiros e companheira de trabalho, Paulo, Gigante e Jisela pela disposição, incentivo e amizade;

Aos técnicos do Laboratório de Estradas, Gigante, Paulo e João, pela amizade e apoio durante a execução dos ensaios laboratoriais;

Aos amigos do Departamento de Transportes, pela amizade;

Aos professores e funcionários do Departamento de Transportes;

Aos professores José Mário e Pedro Zacarin, pelo incentivo e apoio para o ingresso no Departamento de Transportes;

À Asfaltos Continental, pelo fornecimento dos asfaltos utilizados na pesquisa;

À pedreira Bandeirantes, pelo fornecimento dos agregados utilizados na pesquisa;

Ao CNPq, pela concessão da bolsa de estudos;

Aos amigos do apartamento, Roberto, Fabiano e Jeferson;

Aos companheiros de viagem, Clayton, Flavinho, Marcelo e Pedrinho, pela amizade.

Aos companheiros da Vetec, Gilson e Robison, pelo apoio e amizade

“Pequenas tentativas repetidas completarão qualquer empreendimento”

Og Mandino

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	vii
LISTA DE TABELAS	x
LISTA DE SÍMBOLOS.....	xiv
RESUMO	xv
ABSTRACT	xvi
CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO	1
CAPÍTULO 2: REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1.INTRODUÇÃO	4
2.2.DEFORMAÇÃO PERMANENTE EM PAVIMENTOS FLEXÍVEIS	5
2.2.1.Fatores que influem na deformação permanente.....	6
2.2.1.1.Asfaltos.....	7
2.2.1.2.Agregado	8
2.2.1.2.1.Graduação.....	8
2.2.1.3.Outros fatores	10
2.3.MÉTODOS DE ENSAIOS PARA AVALIAÇÃO DA DEFORMAÇÃO PERMANENTE	13
2.3.1.Ensaio de fluência por compressão uniaxial estática (“static creep test”)	14
2.3.1.1.Estágios da deformação permanente axial	17
2.3.1.2.Falta de padronização no ensaio de fluência por compressão uniaxial estática.....	18
2.3.1.3.Critério para avaliação do desempenho das misturas asfálticas.....	19
2.3.2.Ensaio de fluência por compressão uniaxial dinâmica (“dynamic creep test”)	23
2.4.USO DE MODIFICADORES EM ASFALTOS PARA COMBATE À DEFORMAÇÃO PERMANENTE.....	26
2.4.1.Polímeros.....	28
2.4.1.1.Classificação dos polímeros	28
2.4.1.2.Polímero estireno-butadieno-estireno (SBS).....	29
2.4.2.Borracha de pneus	31
2.4.3.Propriedades do asfalto modificado	34
CAPÍTULO 3: MATERIAIS E MÉTODOS.....	39
3.1.INTRODUÇÃO	39

3.2.AGREGADOS	39
3.2.1. Tipo e distribuição granulométrica	39
3.2.2. Características físicas	42
3.2.3. Procedimento de seleção, manuseio e preparação do agregado	43
3.3. ASFALTOS	45
3.3.1. Tipos	45
3.3.2. Características físicas	45
3.4. CONFECÇÃO DOS CORPOS-DE-PROVA	47
3.4.1. Dosagem Marshall	47
3.4.2. Composição dos corpos-de-prova	47
3.4.3. Temperaturas de mistura e compactação	48
3.4.3.1. Temperaturas de mistura e compactação do asfalto convencional (CAP-20).....	48
3.4.3.2. Temperaturas de mistura e compactação do asfalto modificado por polímero SBS.	49
3.4.3.3. Temperaturas de mistura e compactação do asfalto modificado por borracha.....	50
3.4.4. Compactação e cuidados posteriores	51
3.5. ENSAIOS DE COMPRESSÃO UNIAXIAL	52
3.5.1. Equipamentos e programas	52
3.5.2. Ensaio de fluência por compressão uniaxial estática	55
3.5.2.1. Preparação dos corpos-de-prova.....	56
3.5.2.2. Aquisição de dados e processamento dos resultados	57
3.5.3. Ensaio de fluência por compressão uniaxial dinâmica	58
3.5.3.1. Preparação dos corpos-de-prova.....	58
3.5.3.2. Aquisição dos dados e processamento dos resultados.....	58
3.5.4. Planejamento de Experimentos Fatoriais	59
CAPÍTULO 4: APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	64
4.1. INTRODUÇÃO	64
4.2. DOSAGEM MARSHALL	65
4.3. ENSAIOS DE FLUÊNCIA	75
4.3.1. Ensaio de fluência por compressão uniaxial estática	75
4.3.2. Ensaio de fluência por compressão uniaxial dinâmica	83
4.4. ANÁLISE DE VARIÂNCIA (ANOVA)	86
4.4.1. Introdução	86
4.4.2. Resultados da análise de variância	86

4.5. MODELOS ESTATÍSTICOS.....	93
4.5.1. Exemplos da Aplicação de Modelos Polinomiais Multiplicativos..	98
CAPÍTULO 5: CONCLUSÕES.....	104
5.1. INTRODUÇÃO.....	104
5.2. ENSAIO MARSHALL	104
5.3. PLANEJAMENTO DE EXPERIMENTOS FATORIAIS.....	105
5.4. ENSAIO DE FLUÊNCIA POR COMPRESSÃO UNIAXIAL ESTÁTICA	105
5.5. ENSAIO DE FLUÊNCIA POR COMPRESSÃO UNIAXIAL DINÂMICA	106
5.6. CONCLUSÕES GERAIS.....	106
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	108

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Gráfico do número de aplicações de carga versus deformação permanente apresentado no estudo de Qi e Witezak (1998).....	12
Figura 2.2 – Estágios da deformação permanente axial acumulada (MOHAMED e YUE, 1994).....	17
Figura 2.3 - Temperatura versus viscosidade para asfaltos convencionais e para o asfalto ideal (BRÛLÉ, 1996).	35
Figura 3.1 – Faixa granulométrica B do DNER e zona de restrição da especificação “Superpave”.	41
Figura 3.2 – Faixa granulométrica C do DNER e zona de restrição da especificação “Superpave”.	42
Figura 3.3 – Secagem do agregado em estufa.....	44
Figura 3.4 – Lavagem do agregado graúdo para eliminação do excesso de finos.	44
Figura 3.5 – Viscosidade Saybolt-Furol versus temperatura para o asfalto convencional (CAP-20).....	49
Figura 3.6 – Viscosidade Saybolt-Furol versus temperatura para o asfalto modificado por polímero SBS.....	50
Figura 3.7 – Viscosidade Saybolt-Furol versus temperatura para o asfalto modificado por borracha.	51
Figura 3.8 – Corpos-de-prova revestidos com parafina para determinação da densidade.....	52
Figura 3.9 – Partes dos equipamentos utilizados para realização dos ensaios de fluência estática e dinâmica.	53
Figura 3.10 – Exemplo de tela do programa com os gráficos deslocamento x tempo e carga x tempo para ensaio de fluência por compressão uniaxial estática.	54

Figura 3.11 – Exemplo de tela do programa com os gráficos deslocamento x tempo e carga x tempo para ensaio de fluência por compressão uniaxial dinâmica.....	55
Figura 3.12 – Exemplo de uma curva deformação × tempo fornecida pelo ensaio de fluência por compressão uniaxial estática.....	56
Figura 3.13 – Exemplo de tela do programa do processamento dos resultados do ensaio de fluência por compressão uniaxial estática.....	57
Figura 3.14 – Exemplo de tela do programa do processamento dos resultados do ensaio de fluência por compressão uniaxial dinâmica.	59
Figura 4.1 – Densidade aparente versus teor de asfalto para a mistura na distribuição granulométrica B do DNER.....	66
Figura 4.2 – Volume de vazios versus teor de asfalto para a distribuição granulométrica B do DNER.....	67
Figura 4.3 – Relação betume-vazios versus teor de asfalto para faixa B do DNER..	68
Figura 4.4 – Fluência versus teor de asfalto para distribuição granulométrica B do DNER.....	68
Figura 4.5 – Estabilidade versus teor de asfalto para a distribuição granulométrica B do DNER.....	69
Figura 4.6 – Densidade aparente versus teor de asfalto para faixa C do DNER.....	71
Figura 4.7 – Volume de vazios versus teor de asfalto para faixa C do DNER.....	72
Figura 4.8 – Relação betume-vazios versus teor de asfalto para distribuição granulométrica C do DNER.....	72
Figura 4.9 – Fluência versus teor de asfalto para distribuição granulométrica C do DNER.....	73
Figura 4.10 – Estabilidade versus teor de asfalto para distribuição granulométrica C do DNER.....	74
Figura 4.11 – Deformação total medida no ensaio de fluência por compressão uniaxial estática, em função do teor de asfalto utilizado na mistura, para a graduação B.....	99

Figura 4.12 – Deformação total medida no ensaio de fluência por compressão uniaxial estática, em função do teor de asfalto utilizado na mistura, para a graduação C.....	99
Figura 4.13 – Deformação total medida no ensaio de fluência por compressão uniaxial estática, em função da tensão do ensaio.....	100
Figura 4.14 – Deformação recuperável determinada no ensaio de fluência estática, para a graduação B.....	101
Figura 4.15 – Deformação recuperável determinada no ensaio de fluência estática, para a graduação C.....	101
Figura 4.16 – Módulo de fluência determinado no ensaio de fluência dinâmica, para a graduação B.....	102
Figura 4.17 – Módulo de fluência determinado no ensaio de fluência dinâmica, para a graduação C.....	103

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Causas da deformação permanente (MONISMITH, 1976).	11
Tabela 2.2 –Fator de correção (CM).	16
Tabela 2.3 – Alguns critérios para controle da deformação permanente com base na limitação do módulo de fluência (LITTLE et al., 1993).	20
Tabela 2.4 – Critério para controle da deformação através de valores obtidos no ensaio de fluência (LITTLE et al. 1993).	21
Tabela 2.5 – Critério do módulo de fluência para 1 h de carregamento (LITTLE et al., 1993).	22
Tabela 2.6 – Exemplos de tempos de carregamento e repouso, tensão de carregamento e temperatura de ensaios segundo vários autores.	25
Tabela 3.1 – Faixa granulométrica B do DNER-ES 313/97.	40
Tabela 3.2 – Faixa granulométrica C do DNER-ES 313/97.	40
Tabela 3.3 – Resultados dos ensaios de abrasão Los Angeles do agregado.	43
Tabela 3.4 – Resultados dos ensaios de peso específico, adesividade do ligante ao agregado graúdo e adesividade do ligante ao agregado miúdo.	43
Tabela 3.5 – Resultados dos ensaios de caracterização do asfalto convencional.	45
Tabela 3.6 – Resultados dos ensaios de caracterização do asfalto modificado por polímero SBS.	46
Tabela 3.7 – Resultados dos ensaios de caracterização do asfalto modificado por borracha.	46
Tabela 3.8 – Porcentagens e massa de cada fração do agregado para o centro da faixa B do DNER.	47
Tabela 3.9 – Porcentagens e massa de cada fração do agregado para o centro da faixa C do DNER.	48

Tabela 3.10 – Níveis e nomenclatura dos fatores presentes nesta pesquisa.....	60
Tabela 3.11 – Transformação dos fatores A e B, com quatro e três níveis de variação, em dois fatores de dois níveis, X1 e X2, e X3 e X4, respectivamente.	61
Tabela 3.12 – Padrões de acoplamento de efeitos para o experimento 2 x 4 x 3 x 3.	62
Tabela 3.13 – Condições de ensaio realizadas neste trabalho.....	63
Tabela 4.1 – Valores médios dos parâmetros obtidos da dosagem Marshall para mistura com asfalto convencional e distribuição granulométrica B do DNER.	65
Tabela 4.2 – Valores médios dos parâmetros obtidos da dosagem Marshall para mistura com asfalto modificado por polímero SBS e distribuição granulométrica B do DNER.....	65
Tabela 4.3 – Valores médios dos parâmetros obtidos da dosagem Marshall para mistura com asfalto modificado por borracha moída de pneu e distribuição granulométrica B do DNER.	66
Tabela 4.4 – Valores médios dos parâmetros obtidos da dosagem Marshall para misturas asfálticas com asfalto convencional e distribuição granulométrica C do DNER.....	70
Tabela 4.5 – Valores médios dos parâmetros obtidos da dosagem Marshall para misturas asfálticas com asfalto modificado por polímero SBS e distribuição granulométrica C do DNER.	70
Tabela 4.6 – Valores médios dos parâmetros obtidos da dosagem Marshall para misturas asfálticas com asfalto modificado por borracha moída de pneu e distribuição granulométrica C do DNER.	70
Tabela 4.7 – Teores ótimos de asfalto para $V_v = 4\%$	75
Tabela 4.8 – Valores médios da deformação total obtidos do ensaio de fluência por compressão uniaxial estática.	76
Tabela 4.9 – Valores médios da deformação recuperável obtidos do ensaio de fluência por compressão uniaxial estática.....	77
Tabela 4.10 – Valores médios da deformação não recuperável obtidos do ensaio de fluência por compressão uniaxial estática.....	78

Tabela 4.11 – Valores médios de recuperação obtidos do ensaio de fluência por compressão uniaxial estática.....	79
Tabela 4.12 – Valores médios do módulo de fluência para 3600 s obtidos do ensaio de fluência por compressão uniaxial estática.....	80
Tabela 4.13 – Valores médios do módulo de fluência para 4500 s obtidos do ensaio de fluência por compressão uniaxial estática.....	81
Tabela 4.14 – Valores médios da inclinação do trecho entre 1000 s e 3600 s obtidos do ensaio de fluência por compressão uniaxial estática.....	82
Tabela 4.15 – Valores médios da deformação final obtidos do ensaio de fluência por compressão uniaxial dinâmica.....	83
Tabela 4.16 – Valores médios da inclinação do trecho entre 100 s e 5000 s obtidos do ensaio de fluência por compressão uniaxial dinâmica.....	84
Tabela 4.17 – Valores médios do módulo de fluência para 5000 s obtidos do ensaio de fluência por compressão uniaxial dinâmica.....	85
Tabela 4.18 – Análise de variância dos valores da deformação final obtidos do ensaio de fluência por compressão uniaxial estática para o nível de confiança de 95%.....	88
Tabela 4.19 – Análise de variância dos valores da deformação recuperável obtidos do ensaio de fluência por compressão uniaxial estática para o nível de confiança de 95%.....	88
Tabela 4.20 – Análise de variância dos valores da deformação total obtidos do ensaio de fluência por compressão uniaxial estática para o nível de confiança de 95%.....	89
Tabela 4.21 – Análise de variância dos valores de recuperação obtidos do ensaio de fluência por compressão uniaxial estática para o nível de confiança de 95%.....	89
Tabela 4.22 – Análise de variância dos valores da inclinação do trecho entre 1000 s e 3600 s obtidos do ensaio de fluência por compressão uniaxial estática para o nível de confiança de 95%.....	90
Tabela 4.23 – Análise de variância dos valores do módulo de fluência para 3600 s obtidos do ensaio de fluência por compressão uniaxial estática para o nível de confiança de 95%.....	90

Tabela 4.24 – Análise de variância dos valores do módulo de fluência para 4500 s obtidos do ensaio de fluência por compressão uniaxial estática para o nível de confiança de 95%.	91
Tabela 4.25 – Análise de variância dos valores da deformação final obtidos do ensaio de fluência por compressão uniaxial dinâmica para o nível de confiança de 95%. ...	91
Tabela 4.26 – Análise de variância dos valores da inclinação do trecho entre 100 s e 5000 s obtidos do ensaio de fluência por compressão uniaxial dinâmica para o nível de confiança de 95%.	92
Tabela 4.27 – Análise de variância dos valores do módulo de fluência para 5000 s obtidos do ensaio de fluência por compressão uniaxial dinâmica para o nível de confiança de 95%.	92
Tabela 4.28 – Nomenclatura dos fatores avaliados nesta pesquisa e seus números de níveis correspondentes.	93

LISTA DE SÍMBOLOS

d_{tr} = deformação permanente total nas trilhas de roda

E_{perm} = redução na espessura da camada asfáltica

CM = fator de correção do efeito dinâmico

H_0 = espessura da camada asfáltica

σ_{av} = tensão média no pavimento sob carga em movimento

S_{mix} = valor do módulo de rigidez da mistura

G = teste de Grubbs

y_i = valores máximo e mínimo do conjunto de resultados

\bar{y} = média dos resultados

s = desvio padrão dos resultados

Y = variável dependente ou variável de resposta

X1, A, B, C = fatores ou variáveis independentes

RESUMO

Apresentam-se os resultados de uma investigação sobre os fatores que influem no comportamento de revestimentos asfálticos em relação à deformação permanente, avaliado através dos ensaios de fluência por compressão uniaxial estática e dinâmica, realizados em corpos-de-prova moldados segundo as normas do ensaio Marshall. Os fatores selecionados para estudo foram o tipo de asfalto, a distribuição granulométrica do agregado, o teor de asfalto utilizado na mistura e a tensão utilizada para realização dos ensaios de fluência. Foram testados três tipos de asfalto, CAP-20 convencional, CAP-20 modificado com 4,5% de polímero SBS e CAP-20 modificado com 20% de borracha reciclada de pneu, utilizados em quatro teores. A definição dos teores asfálticos utilizados foi realizada a partir de seis dosagens Marshall iniciais, correspondentes às combinações dos três tipos de asfalto e das duas distribuições granulométricas adotadas, referentes aos centros das faixas B e C do DNER-ES 313/97. Os ensaios de fluência foram realizados sob três diferentes tensões, 0,1 MPa, 0,4 MPa e 0,7 MPa. Para avaliação dos efeitos das variações dos fatores citados no comportamento das misturas foi empregada a técnica de planejamento e análise de experimentos fatoriais fracionários assimétricos. Modelos estatísticos, referentes ao comportamento das misturas asfálticas avaliadas com os ensaios de fluência estática e dinâmica, foram obtidos com razoáveis coeficientes de determinação.

Palavras-chave: misturas asfálticas, deformação permanente, asfalto modificado, fracionamento de experimentos.

ABSTRACT

This work presents research results about influential factors in the permanent deformation behavior of asphalt mixes, evaluated through static and dynamic uniaxial creep tests, accomplished in specimens prepared according to the Marshall mix design method. The selected factors used in the analysis are type of binder, aggregate gradation, binder content and stress level used in the creep tests. Three types of binder were tested, conventional CAP-20, CAP-20 modified with 4,5% of SBS polymer and CAP-20 modified with 20% of recycled tire rubber, used in four binder content. The definition of binder content was accomplished starting from six Marshall method, corresponding to the combinations of the three type of binder and of the two adopted gradations, regarding the centers of the gradations B and C of DNER-ES 313/97. The creep tests were accomplished under three different stress, 0,1 MPa, 0,4 MPa and 0,7 MPa. Design and analysis techniques of fractional factorial experiments were used to evaluate the effects of the variations of the above mentioned factors on the mixture behavior. Statistical models of behavior were obtained with reasonable determination coefficients from the static and dynamic creep test.

Key words: asphalt mixes, permanent deformation, modified binder, fractional factorial experiments

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

Dois dos principais defeitos que ocorrem nos pavimentos flexíveis, no Brasil, são o trincamento por fadiga e a deformação permanente nas trilhas de roda. Embora só seja visível na superfície, a deformação permanente pode ocorrer em qualquer camada do pavimento causando depressões, corrugações longitudinais e laterais e outros movimentos (TERREL et al., 1971). Este trabalho concentra-se apenas no mecanismo da deformação permanente na capa asfáltica.

Fatores como aumento do tráfego de veículos pesados, crescimento das cargas e aumento da pressão de enchimento dos pneus causam deformação permanente nas trilhas de roda e, como estes fatores provavelmente não decrescerão, a solução que parece óbvia é aumentar a resistência do concreto asfáltico à deformação permanente. Uma das maneiras de aumentar a resistência do concreto asfáltico quanto à deformação permanente é utilizar modificadores no asfalto. Mas mudanças em uma propriedade podem resultar em mudanças prejudiciais em outras, por exemplo, diminuindo o teor de asfalto aumenta-se a resistência à deformação permanente, porém a resistência à fadiga diminui (PARKER e BROWN, 1992).

Fritz et al.¹ (1992 apud ISACSSON e LU 1995) definem asfalto modificado como sendo aquele obtido pela incorporação de materiais termoplásticos, resinas sintéticas termorrígidas, borracha em pó ou ainda elastômeros. Os asfaltos utilizados nesta pesquisa foram obtidos previamente modificados com polímero estireno-butadieno-estireno (SBS) e borracha moída de pneus.

A importância da utilização de borracha moída de pneus deve-se à preocupação com o meio ambiente. Os estoques de pneus oferecem habitats ideais

¹ FRITZ et al. (1992). English-French-German dictionary of technical terms related to hydrocarbon binders, hydrocarbon composite materials, process for removing pavement material and for the rehabilitation of asphalt pavements. Material and Structures 25, p.171-185.

para procriação de mosquitos. Se estes estoques inflamarem-se, não apenas contaminarão o solo, mas esforços para extinguir o fogo podem também causar contaminação das águas do lençol freático (M.B. TAKALLOU e H.B. TAKALLOU, 1991). No Brasil, segundo dados da Associação Nacional da Indústria de Pneumáticos (ANIP), são descartados anualmente mais de 30 milhões de pneus, sendo 65% desse total descartados de maneira ambientalmente inadequada (ECOLOGIA EM NOTÍCIAS URGENTE, 2002).

É importante ressaltar que o asfalto borracha não é a solução para o problema do descarte de pneus, mas quando utilizado, melhora as características tais como durabilidade, flexibilidade e resistência ao trincamento do concreto asfáltico e contribui significativamente para a redução de pneus descartados (CARLSON e ZHU, 1999).

A maioria dos pavimentos do país são pavimentos flexíveis onde o revestimento é constituído de concreto asfáltico, portanto, qualquer esforço no sentido de melhorar suas propriedades físico-químicas prolongando sua vida útil e diminuir gastos em manutenção (*nenhum pavimento jamais foi imaginado sem se incluir a conservação* (HUBBARD e GRAY, 1937)) é muito relevante. Desde os primórdios da pavimentação asfáltica, pesquisadores vêm adicionando modificadores ao asfalto, tais como borracha natural e polímeros. Pode-se notar que já na década de 60, Barth (1962) via o assunto de asfaltos sintéticos como sendo a solução para os problemas de oxidação e deterioração do asfalto.

O objetivo deste trabalho é avaliar o desempenho das misturas asfálticas quanto ao desenvolvimento de deformação permanente no revestimento asfáltico, à luz de ensaios de fluência realizados sob carregamento estático e dinâmico. Para isso avaliaram-se os efeitos do tipo e do teor de asfalto empregados na mistura, da distribuição granulométrica de um tipo de agregado e da tensão de ensaio. Foram utilizados três diferentes tipos de asfaltos, empregados em quatro teores, e duas distribuições granulométricas do agregado. Os ensaios foram realizados com tensões de 0,1 MPa, 0,4 MPa e 0,7 MPa.

Para avaliação dos efeitos de se variar simultaneamente vários fatores interferentes no comportamento das misturas, em relação à deformação permanente, foi utilizada a técnica de planejamento e análise de experimentos fatoriais

fracionários, através da qual foi possível a redução do número de condições experimentais testadas em laboratório, sem reduzir o número de fatores considerados no experimento.

Com os resultados provenientes da execução em laboratório do experimento fracionado, procurou-se estabelecer modelos de previsão para as propriedades das misturas analisadas.

Cabe ressaltar que esta pesquisa é uma das partes de um estudo de maior abrangência que envolve três dissertações de mestrado e uma tese de doutorado, em que são avaliadas a deformação permanente e o trincamento por fadiga de misturas asfálticas densas com asfalto convencional, asfalto modificado por 4,5% de polímero estireno-butadieno-estireno (SBS) e asfalto modificado por 20% de borracha reciclada de pneu.

Esta dissertação está dividida em cinco capítulos: Introdução, Revisão Bibliográfica, Materiais e Método, Apresentação e Análise dos Resultados e Conclusões.

O capítulo 2, Revisão Bibliográfica, trata da deformação permanente, apresentando suas características e principais fatores que influenciam este tipo de defeito de pavimentos flexíveis, dos ensaios de fluência por compressão uniaxial estática e dinâmica e dos modificadores de asfalto utilizados nesta pesquisa.

No capítulo 3, Materiais e Método, apresentam-se os ensaios de caracterização do agregado e dos asfaltos, o procedimento de seleção, manuseio e preparação do agregado, a dosagem Marshall, os equipamentos e programas para controle dos ensaios de compressão uniaxial estática e dinâmica e o planejamento de experimentos fatoriais.

Os resultados da dosagem Marshall, dos ensaios de fluência por compressão uniaxial estática e dinâmica, a análise de variância e os modelos estatísticos são apresentados no capítulo 4, Apresentação e Análise dos Resultados.

O capítulo 5 trata das conclusões da pesquisa.

CAPÍTULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1.INTRODUÇÃO

No Brasil o pavimento flexível está presente em grande quantidade das vias (ruas e rodovias), embora, apenas 9,5% da malha rodoviária brasileira (federal, estadual e municipal) seja pavimentada (ABEDA, 2001). Portanto, é de grande importância o estudo de novas tecnologias para o revestimento asfáltico, de modo a se ter uma previsão do seu desempenho antes de aplicá-lo nos pavimentos, reduzindo, deste modo, os gastos com restauração. As regiões sudeste e sul possuem, juntas, 57% da extensão total das rodovias brasileiras.

O pavimento asfáltico, primeiramente, serve para proteger a camada de fundação, a qual, na verdade, suporta a carga do tráfego. O comportamento mecânico do revestimento do pavimento deve ser de se deformar prontamente sem romper e, se recuperar elasticamente para não fluir plasticamente, resistindo às tensões do tráfego.

O revestimento asfáltico serve, também, como impermeabilizante para proteger as camadas inferiores contra erosão e enfraquecimento devido à saturação, além de evitar o desgaste provocado pelo tráfego. Segundo Hubbard e Gray (1937) qualquer que seja o custo para drenar uma rodovia ou um leito de rodovia propriamente, é sempre a maneira mais barata para assegurar o máximo de proteção ao subleito.

Dois tipos de solicitação mecânica são observados nas estruturas do pavimento: a flexão repetida, que resulta na fadiga do material e conseqüente trincamento do revestimento asfáltico e a compressão, que contribui para o acúmulo de deformações permanentes (MOTTA e PINTO, 1994).

Além do trincamento por fadiga, outro importante defeito observado nos pavimentos flexíveis no Brasil é a deformação permanente nas trilhas de roda. Embora só seja visível na superfície, a deformação permanente pode ocorrer em

qualquer camada do pavimento, causando depressões, corrugações longitudinais e laterais e outros movimentos (TERREL et al., 1971). Este trabalho concentra-se apenas no mecanismo da deformação permanente na capa asfáltica.

2.2.DEFORMAÇÃO PERMANENTE EM PAVIMENTOS FLEXÍVEIS

A deformação permanente em pavimentos flexíveis desenvolve-se gradualmente com o aumento do número de aplicações de carga, geralmente aparecendo como depressões longitudinais nas trilhas de rodas (MONISMITH, 1992) e, embora só esteja visível na superfície, a deformação permanente pode ocorrer em qualquer camada do pavimento, causando depressões, corrugações longitudinais e laterais e outros movimentos (TERREL et al., 1971).

As causas da deformação permanente podem ser, além da fluência e densificação geradas pelo tráfego, recalque diferencial e fluência das camadas de fundação do pavimento.

Vários métodos de projeto são propostos, por pesquisadores, com o intuito de prever e quantificar a propensão das misturas asfálticas quanto à deformação permanente, por se tratar de um importante dano aos pavimentos flexíveis.

Os principais métodos de previsão da deformação permanente baseiam-se na limitação da deformação vertical de compressão no topo do subleito. Controlando a magnitude da deformação elástica do topo do subleito, a magnitude da deformação permanente é controlada (MONISMITH, 1992).

A análise estatística dos dados fornece modelos matemáticos simples que explicam a taxa de deformação permanente na capa asfáltica como uma função de algumas variáveis significativas (volume de vazios, número de aplicações de carga, temperatura, tensão vertical, tensão horizontal) e suas interações (MEYER et al., 1976).

Um fato que chama a atenção para os estudos desenvolvidos nos EUA e em países da Europa é a observação de trechos reais, submetidos ao carregamento do tráfego de forma real. As medições feitas em campo são essenciais para a formulação

dos modelos matemáticos e a verificação da veracidade das teorias e ensaios laboratoriais.

No Brasil, a medida da deformação permanente das trilhas de roda, como padronizado pelo DNER – PRO 08/94 (1994), é feita com o auxílio de uma treliça de alumínio, com 1,20 m de comprimento na base, dotada de régua móvel instalada em seu ponto médio e que permite a medida, em milímetros, das flechas da trilha de roda.

A hidroplanagem, que surge como resultado do acúmulo de água na deformação permanente na trilha de roda, é um fator que reduz a segurança da rodovia (MAJIDZADEH, 1979). A Federal Highway Administration dos EUA, publicou, em 1979, um manual para identificação e classificação dos defeitos dos pavimentos rodoviários. Nesse manual, a deformação permanente total nas trilhas de roda (“dtr”) é classificada em quatro níveis de severidade (SOUZA et al.² (1991) apud COELHO (1996)):

- 1) hidroplanagem – para valores de “dtr” de 0,2 a 0,25" (\cong de 5,1 a 6,4 mm);
- 2) baixo – para valores de “dtr” de 0,25 a 0,5" (\cong de 6,4 a 12,7 mm);
- 3) médio – para valores de “dtr” de 0,5 a 1,0" (\cong de 12,7 a 25,4 mm);
- 4) alto – para valores de “dtr” superiores a 1,0" ($>$ 25,4 mm).

2.2.1.Fatores que influem na deformação permanente

Segundo análises de KANDHAL et al. (1993), muitas variáveis, tais como volume de vazios, número de aplicações de carga e temperatura, contribuem para a deformação permanente, mas nenhuma prediz adequadamente este defeito.

Em seguida, apresentam-se alguns fatores que influem na deformação permanente de trilhas de roda, sendo considerada maior atenção ao asfalto e ao agregado, pois o objetivo deste trabalho consiste na avaliação dos efeitos do tipo de asfalto e da distribuição granulométrica de um tipo de agregado nas fluências estática e dinâmica de misturas asfálticas densas.

² SOUZA et al. (1991). Summary report on permanent deformation in asphalt concrete. *Strategic Highway Research, Report SHRP-A/IR-91-104*.

2.2.1.1. Asfaltos

O papel do asfalto na mistura asfáltica é atuar como uma cola para manter o esqueleto mineral consolidado. Sem o asfalto, o esqueleto mineral confeccionado para utilização na mistura asfáltica, não seria capaz de suportar a ação do tráfego. Portanto, o asfalto deve ser resistente o suficiente para impedir que as partículas dos agregados sejam deslocadas e para resistir ao cisalhamento provocado nos pontos de contato dos agregados (HUBER, 1999).

Os asfaltos obtidos da destilação do petróleo podem ser subdivididos em três grupos:

- Sólidos, que são os asfaltos soprados/oxidados,
- Semi-sólidos, que são o cimento asfáltico de petróleo (CAP) e
- Líquidos

Os asfaltos líquidos constituem-se das emulsões asfálticas, que são dispersões coloidais de uma fase asfáltica em uma fase aquosa ou vice-versa, as quais são obtidas a partir da misturação, em meio intensamente agitado, de asfalto aquecido com água, na presença de emulsificantes; e dos asfaltos diluídos, os quais são diluições de solventes de petróleo de volatilidade adequada, que após a aplicação evaporam-se completamente deixando como resíduo o CAP que então desenvolve as propriedades aglutinantes. O fenômeno da evaporação do diluente chama-se cura.

A vantagem do uso dos asfaltos diluídos é que estes podem ser aplicados em temperatura ambiente, não necessitando serem aquecidos para a aplicação em campo.

É recomendado que em vias de tráfego leve a porcentagem de asfalto seja maior que em vias de tráfego pesado, para auxiliar, deste modo, a durabilidade do concreto asfáltico. A razão de se evitar alta porcentagem de asfalto em vias de tráfego intenso decorre do problema de exsudação, que surge pela alta densificação da mistura asfáltica em conjunto com altas temperaturas.

Como dito anteriormente, a deformação permanente é afetada pelo aumento do tráfego de veículos pesados, pelo crescimento das cargas e aumento da pressão de enchimento dos pneus e, sabendo que estes fatores não decrescerão, a solução que parece óbvia é aumentar a resistência do concreto asfáltico à deformação permanente (PARKER e BROWN, 1992). Uma maneira de se obter melhora na resistência do

asfalto é através do uso de modificadores, tais como, polímeros e borracha de pneu. O item 4 trata do uso de modificadores e das propriedades do asfalto modificado.

2.2.1.2.Agregado

A preocupação com a qualidade dos agregados utilizados em pavimentação asfáltica não é recente. Segundo Hubbard e Gray (1937), “os agregados minerais constituem de 88 a 96% do peso, ou mais de 75% do volume das construções asfálticas, suas propriedades têm efeito muito importante nas características de tais construções. Na construção rodoviária asfáltica, o controle das características dos agregados minerais é tão importante quanto o controle dos produtos asfálticos.”

No estudo de Parker e Brown (1992), as propriedades estudadas dos agregados foram: graduação, porcentagem de faces fraturadas do agregado graúdo e forma e textura do agregado miúdo. Eles obtiveram baixas correlações entre essas propriedades e a taxa de deformação permanente, o que demonstra que o processo de deformação permanente é complexo e afetado por vários fatores. As propriedades do agregado e o teor de ligante são aspectos igualmente importantes para o projeto da mistura e posterior execução em campo.

Nesta pesquisa somente um tipo de agregado é utilizado, sendo avaliado apenas sua distribuição granulométrica, pois através da literatura consultada, nota-se melhora da resistência à deformação permanente quando agregados de grande tamanho são utilizados na confecção da mistura asfáltica.

2.2.1.2.1.Graduação

Segundo Momm e Domingues (1996), o comportamento das misturas asfálticas é afetado pela graduação do agregado, pela relação de vazios do agregado mineral, pelo teor de betume, pelos tipos de fíler e pela relação de materiais finos na avaliação da fadiga e da deformação permanente.

Ainda segundo Momm e Domingues (1996), é possível obter-se misturas betuminosas de comportamento totalmente diferentes utilizando-se misturas que se

enquadrem em uma mesma faixa granulométrica, devido à ampla variação da porcentagem de material passado especificado para um dado intervalo.

Em estudo de Brown e Basset (1990), verifica-se que o aumento do tamanho dos agregados aumenta a qualidade da mistura com respeito ao ensaio de fluência (creep) e à tensão de tração direta, o que não ocorreu com a estabilidade Marshall. Outra qualidade verificada foi o aumento da aderência entre o pneu e o pavimento. Porém, no trabalho de Cross e Brown (1992), a graduação não forneceu correlação com a taxa de deformação permanente, o fator que mais influenciou foi a forma das partículas de agregado, quanto mais faces fraturadas, menor a deformação permanente; fato também observado em estudo de Kim et al. (1992) com agregados ásperos e polidos, no qual observa-se que os concretos asfálticos com agregados polidos sofreram maiores deformações permanentes, provavelmente pela forma arredondada das partículas e pelo polimento das mesmas. Segundo Huber (1999), areias naturais tem sido identificadas como uma causa de deformação permanente.

Na pesquisa de Mohamed e Yue (1994) tem-se encontrado alta resistência à deformação permanente com o uso de agregados de maior tamanho que o usual, pois o contato agregado-agregado fornece alta resistência às tensões produzidas pelo tráfego.

Kim et al. (1992), baseados em trabalhos de diversos autores, afirmam que a resistência à deformação permanente aumenta com uma textura superficial do agregado mais rugosa, com uma graduação contínua, com as partículas do agregado com faces mais angulares e com maior tamanho máximo dos agregados. Observaram também que mudanças nas proporções de agregado graúdo e miúdo com um mesmo tamanho nominal máximo, não afetaram significativamente a deformação permanente.

Segundo Parker e Brown (1992), com cerca de 4% de volume de vazios a capacidade do concreto asfáltico de resistir à deformação permanente é máxima. Para essa porcentagem de volume de vazios é crítico que a estrutura do agregado tenha capacidade de resistir às densificações impostas pelo tráfego, característica observada com agregados bem graduados e com partículas de textura rugosa e angular.

Em relação à zona de restrição da distribuição granulométrica do processo de projeto de misturas asfálticas “Superpave”, a qual foi adotada com o objetivo de reduzir deformações permanentes prematuras, Chowdhury et al. (1992) afirmam que se trata de um dos componentes mais controversos do processo, sendo sua validade questionada por órgãos rodoviários e industriais. Em trabalho de Kandhal e Cooley (2002) é dito que, baseado nas recomendações do National Council of Highway Research Program (NCHRP) Project 9-14 “Investigation of the Restricted Zone in the Superpave Aggregate Gradation Specification”, espera-se que a zona de restrição seja excluída da especificação “Superpave”.

Estudando quatro tipos de agregados com tamanho nominal máximo de 19 mm e três diferentes graduações: acima, através e abaixo da zona de restrição, Chowdhury et al. (1992) concluíram que quando se utiliza agregados britados não há razão para acreditar que um agregado passando através da zona de restrição produza misturas asfálticas susceptíveis à deformação permanente.

2.2.1.3.Outros fatores

Majidzadeh et al. (1976) dizem que a tendência de carregamentos mais pesados e maior pressão de enchimento dos pneus, juntamente com o substancial aumento do número de repetições de aplicação de carga, tem aumentado significativamente a importância do fenômeno da deformação permanente.

A combinação de alta pressão de enchimento dos pneus, alta temperatura e pavimento delgado é extremamente danosa. Do ponto de vista técnico, a pressão de enchimento do pneu sozinha não aparece como maior fator contribuinte na deformação permanente prematura (SMITH, 1991).

Ainda no estudo de Smith (1991), que foi realizado em equipamento de verdadeira grandeza, variou-se o carregamento e a pressão de enchimento dos pneus com aplicação de 500.000 solicitações. O efeito do carregamento foi maior que o da pressão de enchimento nas seções dos pavimentos e condições climáticas estudadas.

A deformação permanente devido ao tráfego pode ser definida, ou pelo menos limitada, como deformação dependente do tempo ou mudança de volume, ambos causados pela densificação de uma ou mais camadas do pavimento (TERREL

et al., 1971). Observou-se na pista experimental da American Association of State Highway Officials (AASHO) que 20% da deformação permanente no revestimento de concreto asfáltico foi causada pela densificação imposta pelo tráfego (MEDINA, 1997). Em estudo realizado em pavimentos de Oklahoma, Oteng-Seifah e Manke (1976), verificaram significativas diferenças na densidade dos materiais localizados na trilha de roda e fora dela, fato que já havia sido observado por Epss et al. (1970), confirmando a grande contribuição que a densificação causada pelo tráfego tem na deformação total da superfície.

A Tabela 2.1 resume algumas causas e os danos a elas relacionadas, segundo Monismith (1976).

Tabela 2.1 – Causas da deformação permanente (MONISMITH, 1976).

Causa Geral	Fator Causativo Específico	Exemplo de danos
Devido ao Tráfego	Poucas cargas excessivas	Fluência Plástica
	Carregamento de longa duração	Fluência (dependente do tempo)
	Carregamento repetitivo	Deformação Permanente (resultante do acúmulo de pequenas deformações associadas à passagem das cargas de rodas)
Não Associado ao Tráfego	Solo expansível do subleito	Mudança de volume
	Material compressível das camadas da estrutura do pavimento	Consolidação

A deformação permanente é mais acentuada nos primeiros anos de vida do pavimento devido a uma maior consolidação causada pela ação do tráfego. Outro fator importante para a deformação permanente é a temperatura, pois, para qualquer condição, a taxa de deformação permanente torna-se maior com o aumento da temperatura (MAJIDZADEH, 1979). Entretanto, segundo Kandhal (1993), após a inicial densificação pelo tráfego, a taxa de deformação permanente decresce com o aumento deste até a condição fluência plástica ocorrer, onde à partir de então a taxa de deformação permanente volta a crescer.

Segundo estudo de Qi e Witczak (1998), fica claro que a deformação permanente aumenta com o aumento do tempo de carregamento. Isto ajuda a explicar porque áreas de tráfego lento (por ex.: interseções e faixas ascendentes) têm uma tendência para deformação permanente maior que as áreas de tráfego de alta velocidade. Na figura 2.1 observa-se que as deformações são maiores na interseção, pois o tempo de carregamento neste local é maior que na rodovia propriamente dita.

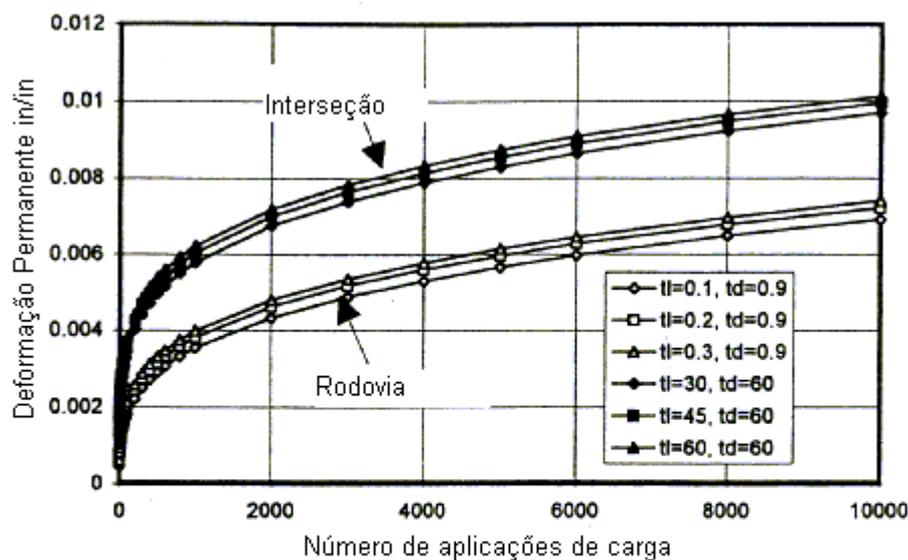


Figura 2.1 – Gráfico do número de aplicações de carga versus deformação permanente apresentado no estudo de Qi e Witczak (1998).

2.3.MÉTODOS DE ENSAIOS PARA AVALIAÇÃO DA DEFORMAÇÃO PERMANENTE

O principal objetivo dos testes laboratoriais é reproduzir as condições dos pavimentos encontradas *in situ*, tais como tensões e temperatura da mistura. Estas condições devem ser obtidas sob circunstâncias que permitam a medida precisa da deformação, para, à partir de então, obter-se relações de tensão-deformação (BROWN, 1976).

O grande número de variáveis no projeto e construção do pavimento de concreto asfáltico, que influem no desempenho do pavimento, dificultam o desenvolvimento de um teste que relacione o projeto com a qualidade que a mistura asfáltica terá em campo. Essas variáveis incluem o agregado (tipo, porosidade, graduação e dureza), cimento asfáltico (quantidade, qualidade, tipo), compactação, entre outras. Existem ainda fatores e condições à parte da mistura que afetam a profundidade da deformação permanente e o tempo na qual elas efetivamente ocorrem: temperatura do ar, aquecimento solar e carregamentos são os mais importantes (MARKS et al., 1991). Isacsson e Lu (1995) defendem a idéia de que o desempenho de campo deve ser caracterizado por medidas em campo e não através de testes laboratoriais de amostras retiradas do pavimento. Essas duas observações são importantes, pois, desenvolver projetos de misturas asfálticas, sem especificar métodos para controle e avaliação não é viável e, por outro lado, o desempenho verificado em campo é muito importante para aferição das especificações e para trabalhos futuros.

Segundo o Road Research Laboratory³ (1962) apud Coelho (1994), o exame da resistência das misturas asfálticas quanto à deformação permanente pode ser feito através de métodos de ensaio que se dividem em três tipos:

- métodos de ensaio empíricos;
- métodos de ensaio das propriedades fundamentais e
- métodos de ensaio por simulação de tráfego.

³ ROAD RESEARCH LABORATORY (1962).

Nos métodos de ensaio empíricos estão incluídos os primeiros métodos desenvolvidos para a dosagem de misturas asfálticas, entre eles podemos citar: o método Marshall, o método Hubard-Field e o método de Hveen.

Nos métodos de ensaio das propriedades fundamentais, a resistência à tração, resistência à compressão, resistência ao cisalhamento e resistência à flexão são obtidas por ensaios laboratoriais tais como: ensaios de tração simples, ensaios de tração e compressão triaxial, ensaios de cisalhamento puro, ensaios de compressão axial ou hidrostática.

Os métodos de ensaio por simulação de tráfego reproduzem a ação do tráfego sobre placas ou segmentos de misturas asfálticas e, à partir de então, conseguem obter informações da resistência dessas misturas às deformações permanentes. O ensaio de trilha-de-rodas (“wheel-tracking tests”) é o que melhor simula as condições reais que ocorrem em campo, porém, seu uso está restrito às atividades de pesquisa pela pouca disponibilidade de equipamentos e pelo tempo despendido para a realização do ensaio e obtenção dos resultados. Seria importante, que este tipo de ensaio, fosse também designado para melhoramentos nos métodos de dosagem.

Segundo Brown (1976), o teste de carregamento triaxial repetido é o melhor método para análise dos materiais dos pavimentos no contexto de projeto considerando-se a deformação permanente.

2.3.1. Ensaio de fluência por compressão uniaxial estática (“static creep test”)

Este ensaio consiste na aplicação de uma carga estática axial de compressão constante em um corpo-de-prova durante determinado período de tempo a uma temperatura pré-fixada e invariável durante o ensaio (COELHO, 1996).

Os primeiros equipamentos utilizados para este ensaio foram os mesmos empregados nos ensaios de adensamento de solos, com as devidas adaptações. Atualmente os equipamentos empregados são munidos de LVDTs (“linear variable differential transducers”) que fazem a medição e registro eletrônico das deformações, o que não significa que equipamentos mais simples não forneçam bons resultados (COELHO, 1996).

O uso deste método teve grande impulso na década de 1970, com os estudos realizados na Holanda no laboratório da companhia Shell. O objetivo de Hills (1973) foi desenvolver um ensaio que caracterizasse satisfatoriamente o comportamento mecânico das misturas asfálticas quanto à deformação. Neste mesmo ano, Hills, sabendo que uma mistura asfáltica consiste numa estrutura de partículas de agregados separados por uma fina camada de asfalto e vazios, e que as curvas de fluência obtidas através deste ensaio indicam a contínua mudança na estrutura interna da mistura durante a aplicação da carga, elaborou modelos teóricos para a deformação permanente das misturas asfálticas, os quais constituem a base teórica do creep estático. Nos modelos teóricos foi assumido que quaisquer deformações da mistura asfáltica são o resultado do deslocamento entre duas partículas minerais próximas separadas por uma fina película de asfalto. A taxa de deformação é dependente da magnitude das tensões, da espessura da película de asfalto e das propriedades do asfalto (VAN DE LOO, 1978).

Segundo Van de Loo (1974), o ensaio de fluência por compressão uniaxial estática pode ser considerado uma ferramenta simples para julgar a estabilidade da mistura asfáltica, pois seus resultados são mais precisos que os obtidos com os ensaios convencionais, como o ensaio Marshall, por exemplo. A principal observação de Van de Loo (1974) quanto ao ensaio Marshall é que devido à sua natureza destrutiva, ele classifica as misturas asfálticas em termos de sua resistência ao rompimento.

Van de Loo (1976), desenvolveu um método de projeto de pavimento em que a redução da espessura da camada asfáltica é o fator determinante na aceitação ou rejeição do projeto. A espessura total do pavimento é determinada através do critério de máxima deformação de compressão permissível no topo do subleito e máxima deformação horizontal na base da capa asfáltica. Através do ensaio de fluência por compressão uniaxial, o módulo de rigidez da mistura asfáltica é determinado como uma função do módulo de rigidez do asfalto (VAN DE LOO, 1978). De posse destes dados, a redução na espessura da camada asfáltica pode ser determinada através da fórmula:

$$E_{perm} = CM \times H_0 \times \sigma_{av} / S_{mix} \quad (3.1)$$

onde:

E_{perm} = redução na espessura da camada asfáltica

CM = fator de correção do efeito dinâmico;

H_0 = espessura da camada asfáltica;

σ_{av} = tensão média no pavimento sob carga em movimento e

S_{mix} = valor do módulo de rigidez da mistura.

No estudo de Van de Loo (1978), um grande número de misturas asfálticas foram analisadas através do ensaio de fluência uniaxial estática e também através de um simulador de tráfego, para comparação das deformações permanentes. Desta comparação bons resultados foram obtidos, mas, em geral, as deformações do simulador de tráfego foram maiores que as do ensaio de fluência uniaxial estática. Van de Loo (1978) explica este fato como sendo resultado de diferenças entre o comportamento estático (creep) e dinâmico (deformação permanente) da mistura asfáltica, o que justifica a introdução do fator de correção (CM) na expressão do autor para o cálculo da deformação permanente. Este fator depende do tipo de mistura (tabela 2.2).

Tabela 2.2 –Fator de correção (CM).

	Tipo de Mistura	CM
Aberta ↑	Areia-asfalto e Misturas de areia-asfalto magras	1,6 – 2,0
	Concreto asfáltico aberto e magro	
	Macadame betuminoso aberto	1,5 – 1,8
	Concreto asfáltico	
	Areia-asfalto-pedregulho	1,2 – 1,6
	Macadame betuminoso denso	
↓ Fechada	Mastiques asfálticos	
	Asfalto rolado denso	1,0 – 1,3

Em 1977 este método foi incorporado no guia de projeto de pavimentos asfálticos da Shell⁴.

2.3.1.1. Estágios da deformação permanente axial

Resultados de testes de Mohamed e Yue (1994) indicam que a deformação permanente axial acumulada divide-se em três estágios distintos, com o aumento do número de solicitações (Figura 2.2).

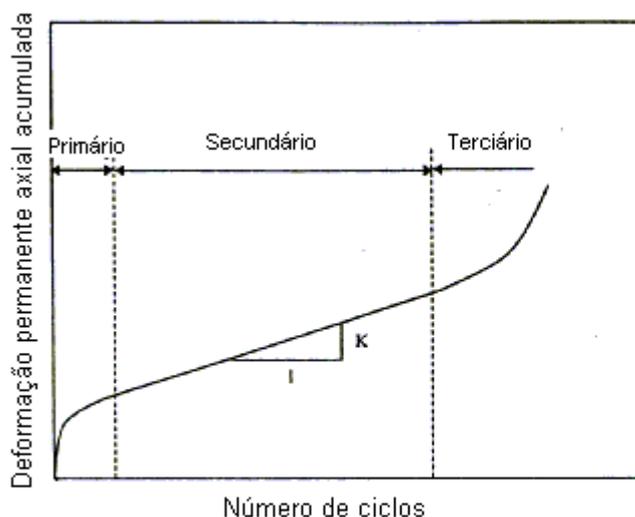


Figura 2.2 – Estágios da deformação permanente axial acumulada (MOHAMED e YUE, 1994).

No primeiro estágio, grandes deformações ocorrem em um curto período de tempo, indicando uma alta taxa de deformação (inclinação da curva). A alta taxa de deformação inicial implica num imediato decréscimo da altura do corpo de prova durante os primeiros segundos em que a carga é aplicada. Uma razão deste elevado

⁴ The Shell Pavement Design Manual, Koninklijke//Shell-Laboratorium, Amsterdam, 1977, Shell International Petroleum Co., 1977.

decréscimo de altura pode estar relacionada à superfície irregular da amostra, que leva a pontos com elevada concentração de tensões, resultando nas altas deformações observadas. Outros mecanismos, tal como a densificação da mistura asfáltica resultante da redução do volume de vazios, pode também levar a altas taxas de deformações.

Durante o segundo estágio, a taxa de acúmulo da deformação permanente permanece constante; esta taxa constante (k) é utilizada para avaliação do potencial de deformação de diferentes misturas. Quanto maior o valor da inclinação do segundo estágio, maior a susceptibilidade da mistura à deformação permanente. Neste estágio, a deformação permanente é causada principalmente pela deformação cisalhante.

O terceiro estágio está associado à formação de trincas. Entre os fatores que podem levar a falhas prematuras estão: a não homogeneidade da mistura, excentricidade da placa de carregamento e inclinação da superfície da amostra.

2.3.1.2. Falta de padronização no ensaio de fluência por compressão uniaxial estática

No ensaio de fluência por compressão uniaxial estática nota-se a falta de padronização das pressões, tempo de carregamento e descarregamento, da temperatura do ensaio, das dimensões do corpo de prova e dos parâmetros para a avaliação das misturas asfálticas.

Segundo Lai e Hufferd (1976), o comportamento dependente do tempo, de um material viscoelástico linear, pode ser caracterizado por meio de um ensaio de fluência com tensão constante apenas para pequenos níveis de tensão, argumento também utilizado por Van de Loo (1974). Outros pesquisadores, como Mohamed e Yue (1994), contestam este argumento utilizando níveis de tensão maiores, baseados na pressão de enchimento dos pneus de veículos comerciais, para simular de maneira mais realista as tensões ocorridas em campo.

A temperatura tem grande influência nos resultados dos ensaios de fluência. O valor da taxa de deformação durante o segundo estágio (estágio de deformação constante) aumenta em média dez vezes quando a temperatura de ensaio passa de 25°C para 40°C (MOHAMED e YUE, 1994).

Como este ensaio ainda não está normalizado, são observados experimentos feitos com diferentes dimensões de corpos de prova, mas segundo Souza et al.⁵ (1991) apud Coelho (1996), os resultados do ensaio de fluência por compressão uniaxial estática, quando explicitados na forma de deformação, não são influenciados pelo formato (prismático ou cilíndrico) nem pelas dimensões do corpo de prova, desde que as bases do corpo-de-prova sejam paralelas entre si e estejam polidas e lubrificadas. Mohamed e Yue (1994) confirmam que a altura da amostra tem pouca ou nenhuma influência nas deformações acumuladas.

2.3.1.3. Critério para avaliação do desempenho das misturas asfálticas

O ensaio de fluência por compressão uniaxial estática apesar de ser um ensaio que melhor relaciona o comportamento da mistura asfáltica que o ensaio Marshall, quanto à deformação permanente, ainda não possui critérios claros que associem os resultados deste com a capacidade das misturas asfálticas em suportar as deformações permanentes (COELHO, 1996).

O módulo de fluência, que é relação entre a tensão aplicada e a deformação relativa, obtido através de ensaios de fluência uniaxial estática com carregamento constante feitos em laboratório, foi utilizado por alguns pesquisadores para caracterizar misturas asfálticas quanto à resistência à deformação permanente. A tabela 2.3 mostra alguns critérios que empregam a limitação do módulo de fluência.

⁵ SOUZA et al. (1991). Summary report on permanent deformation in asphalt concrete. *Strategic Highway Research, Report SHRP-A/IR-91-104*

Tabela 2.3 – Alguns critérios para controle da deformação permanente com base na limitação do módulo de fluência (LITTLE et al., 1993).

Referência	Tempo de Ensaio (min)	Temperatura (°C)	Tensão (kPa)	Módulo de Fluência mínimo (MPa)
VILJOEN ^e MEADOWS ⁶ apud LITTLE et. Al (1993)	100	40	207	82,7
FINN et al. (1983) ⁷ apud SOUZA et al. (1991)	40	60	200	135
KDHER ⁸ apud LITTLE et al. (1993)	60	40	207	137,9
KRONFUSS et al. ⁹ apud LITTLE et al. (1993)*	60	40	103	20,7 ou acima ^a 20,7 até 31,0 ^b 31,0 até 45,3 ^c

^a tráfego de baixa intensidade

^b tráfego de média intensidade

^c tráfego de alta intensidade

*O critério proposto por Kronfuss et al.⁹ apud Little (1993), apresenta os valores do módulo de fluência como uma faixa de variação e não como um valor mínimo.

Como outro critério de avaliação da capacidade das misturas asfálticas em suportar as deformações permanentes baseado no ensaio de fluência por compressão uniaxial estática, pode-se citar o desenvolvido por Little et al. (1993). Este critério obedece os seguintes passos:

- a) o ensaio de fluência por compressão uniaxial estática deve ser realizado à temperatura de 40°C e com duração de 1 h;

⁶ VILLJOEN, 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 of Road Research, Pretoria, South Africa.

⁷ FINN, F.; MONISMITH, C.L.; MARKEVICH, N.J. (1983). *Pavement performance and asphalt concrete mix design*. The Association of Asphalt Paving Technologists, Proceedings, vol. 52.

⁸ KDHER, S.A. (1986). *Deformation Mechanism in Asphalt Concrete*. Journal of Transportation, ASCE, Vol. 112.

⁹ KRONFUSS, R.; KRZERMEN, R.; NIEVELT, G.; PUTZ, P. (1984). *Verformungsfestigkeit von Asphalten Ermittlung in Kriechtest*. Bundesministerium für Bauten und Technik, Strassenforschung, Heft 240, Wien, Austria.

- b) determinar a intensidade do tráfego da rodovia através do número de solicitações do eixo padrão de projeto, para os 180 dias mais quentes do ano;
- c) com tabelas apropriadas para cada tipo de mistura, determinar o nível de tensão normal em que o ensaio deve ser realizado; os valores entre 344,8 kPa e 413,7 kPa são adequados para a maioria dos projetos;
- d) proceder o ensaio de fluência por compressão uniaxial estática;
- e) traçar a curva de fluência em escala aritmética com o objetivo de verificar se durante o ensaio o estágio de ruptura foi atingido;
- f) determinar a inclinação da curva de fluência durante o estágio de deformação constante entre, aproximadamente, 1000 e 3600 segundos;
- g) com o valor obtido do passo anterior e a deformação total após 1 h de carregamento, examinar, através das tabelas 2.4 e 2.5, se a mistura asfáltica é aceitável para o tráfego previsto. Caso a mistura não seja aceitável para o nível de tráfego pretendido, alterar sua composição mediante alterações nas porcentagens e/ou nas características dos agregados e do ligante asfáltico.

Tabela 2.4 – Critério para controle da deformação através de valores obtidos no ensaio de fluência (LITTLE et al. 1993).

Deformação total em 1 h de carregamento (%)	Inclinação da curva de fluência no estágio de deformação constante					
	< 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	-	-	-

I – Tráfego de baixa intensidade: $< 10^5$ solicitações do eixo padrão.

II – Tráfego de moderada intensidade: $10^5 < \text{solicitações do eixo padrão} < 5 \times 10^5$.

III – Tráfego da alta intensidade: $5 \times 10^5 < \text{solicitações do eixo padrão} < 10^6$.

IV – Tráfego de muito alta intensidade: $> 10^6$ solicitações do eixo padrão.

deve também ter $\varepsilon_p < 0,8\%$ para 1800 segundos de carregamento.

deve também atender o seguinte critério: $\varepsilon_{rt} + \varepsilon_p < 0,5 \varepsilon_{qu}$, onde ε_{rt} é a deformação resiliente total obtida no ensaio de módulo resiliente uniaxial, ε_p é a deformação permanente no final do carregamento e ε_{qu} é a deformação obtida no ensaio de compressão não-confinada, de acordo com ASTM T 167.

Tabela 2.5 – Critério do módulo de fluência para 1 h de carregamento (LITTLE et al., 1993).

Resistência à formação de trilhas-de-rodas	Nível de intensidade de tráfego	Módulo de fluência mínimo (MPa), para ensaio de tensão constante de:		
		207 kPa	345 kPa	483 kPa
Alta	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
Moderada	IV	51,7	69,0	96,5
	III	34,5	50,0	96,0
	II	24,1	41,4	51,7
	I	17,2	20,7	27,6

Dos resultados de Oliver et. al. (1997), o ensaio de fluência prediz corretamente a susceptibilidade à deformação permanente de misturas com mesma graduação mas com diferente tipo de asfalto, porém, o mesmo não pode ser dito quando o desempenho está sendo avaliado com diferentes graduações. Esta inabilidade de classificar corretamente a resistência à deformação das misturas com diferentes graduações de agregado é considerada um sério impedimento para o uso deste ensaio em projetos de misturas, onde o objetivo é selecionar a composição do agregado e a porcentagem de asfalto.

Quando modificado por polímero, o asfalto sofre mudanças significativas no comportamento reológico, não existindo uma correspondência linear entre o esforço aplicado e a deformação produzida (OLIVER et al., 1997). Ensaio de carregamento constante não permitem que os materiais se comportem elasticamente, deste modo, subestimam a resistência à deformação plástica dos asfaltos modificados (INSTITUTO BRASILEIRO DE PETRÓLEO (IBP), 1996). Este fato é confirmado por Monismith (1992), onde dados de ensaios sugerem que uso do teste de fluência pode superestimar a deformação permanente para misturas contendo asfaltos modificados.

2.3.2. Ensaio de fluência por compressão uniaxial dinâmica (“dynamic creep test”)

Este ensaio consiste de aplicações de cargas de compressão uniaxiais de curta duração (geralmente 0,1 s) seguida de um intervalo em repouso (geralmente 0,9 s) em corpos de prova cilíndricos.

De acordo com Mohamed e Yue (1994), carga repetitiva uniaxial de compressão em amostras cilíndricas de concreto asfáltico, simula as cargas repetidas do tráfego nos pavimentos asfálticos. Através deste tipo de ensaio é possível obter, para todas as amostras, uma taxa constante de deformação permanente acumulada; através desta taxa é possível avaliar a susceptibilidade desta à deformação permanente.

Segundo Ullmager (1996), o “dynamic creep test” aparece como alternativa interessante para a avaliação de misturas asfálticas quanto à deformação permanente, pois o ensaio de trilhas de roda, apesar de em alguns casos ter resultado em boas correlações com a medida da deformação permanente em campo, é bastante trabalhoso para ser executado.

Conforme Valkering et al. (1990) o “static creep test” é capaz de avaliar o efeito do asfalto na estabilidade da mistura em termos de deformação permanente para asfaltos convencionais, entretanto, quando o asfalto é modificado por polímeros, em particular pelo SBS, o comportamento reológico é alterado, e este ensaio não é mais capaz de avaliar a mistura, o que não acontece com o ensaio dinâmico. Tayebali

et al. (1992) explicam que a rigidez da mistura asfáltica não avalia a tendência de deformação permanente em misturas que contêm asfalto modificado. A deformação permanente acumulada obtida sob carregamento dinâmico é quem melhor representa o potencial para a deformação permanente em misturas contendo asfalto modificado.

As misturas asfálticas adquirem sua estabilidade não tanto pelas forças de coesão, mas principalmente pelo atrito dos agregados e, no método usual do “dynamic creep test”, o diâmetro da placa de aplicação de carga é o mesmo do corpo de prova, que segundo Ulmgren (1996), não julga corretamente as misturas. Portanto, Ulmgren (1996) sugere o aumento do diâmetro do corpo de prova e manutenção do diâmetro da placa para criar um confinamento lateral, que retrataria a realidade de campo. Ainda segundo este autor, resultados de comparação entre ensaios de trilha de roda e o método do “dynamic creep test” fornecem baixo coeficiente de correlação, 0,36; enquanto que resultados da comparação dos ensaios de trilhas de roda com o “dynamic creep test” com diâmetro do corpo de prova maior que o da placa produzem coeficiente de correlação de 0,91. Outros pesquisadores, Superpave Mixture Design Guide (2001), reforçam o fato de que ensaios de fluência com confinamento possuem maior correlação com a deformação permanente que os ensaios sem confinamento.

Para comparar o desempenho de misturas asfálticas, as deformações permanentes são tipicamente apresentadas como uma função do acúmulo de solicitações do eixo padrão (CARPENTER, 1992). Porém, pobres correlações foram obtidas entre o resultado do ensaio de fluência e a deformação permanente por milhões de repetições do eixo padrão (MARKS et al., 1991).

Assim como no “static creep test”, existe também neste ensaio, a falta de padronização dos tempos de carregamento e de repouso, tensão de carregamento, da altura do corpo de prova e da temperatura, entre outros. Na Tabela 2.6 alguns exemplos de especificações são citados de acordo com vários autores.

Tabela 2.6 – Exemplos de tempos de carregamento e repouso, tensão de carregamento e temperatura de ensaios segundo vários autores.

Pesquisador(es)	Tempo de carga (s)	Tempo de Repouso (s)	Tensão de carregamento kPa	Temperatura do ensaio (°C)
MAJIDZADEH e KHEDR (1979)*	0,125	0,375	206,7 - 402,4	27 – 38 – 49
VALKERING et al. (1990)	0,2	1,8	100	40 – 50
SRIVASTAVA et al. (1992)	0,9	5,4	-	40
HANSON et al. (1994)	0,1	0,9	827**	***
MOHAMED e YUE (1994)	0,2	1,8	690	25 – 40
CORTÉ et al. (1994)	0,2	1,8	100	40
SOUSA et al. (1993) apud SÁ e MOTTA (1995)	0,1	0,6	69	60
SÁ e MOTTA (1995)	0,1	0,9	100 - 400	25 – 45
ULMGREN (1997)	1	1	100	***
QI e WITCZAK (1998)	0,1	0,1	138	38
TAIRA e FABBRI (1999)	0,2	1,8	100	40

* utilização de prensa eltro-hidráulica

** pressão de confinamento de 138 kPa

*** temperatura não especificada

Corté et al. (1994) afirmam que o “dynamic creep test” pode ser considerado promissor para predizer o desempenho das misturas asfálticas quanto à deformação permanente, por melhor representar as condições de campo.

2.4.USO DE MODIFICADORES EM ASFALTOS PARA COMBATE À DEFORMAÇÃO PERMANENTE

O aumento do tráfego associado ao aumento das cargas por eixo das rodovias demanda melhor desempenho dos pavimentos, levando os engenheiros a investigar como as propriedades dos materiais do pavimento asfáltico podem ser melhorados pelo uso de aditivos (SALTER e MAT, 1990).

O chamado asfalto modificado não é um material recente, há muito tempo este tipo de material vem sendo utilizado em obras de pavimentação. Em 1823, um inglês requereu a patente de um asfalto contendo borracha natural. Após a 2ª Guerra Mundial, o polímero sintético começou a competir com a borracha natural como aditivo em asfaltos. Atualmente há grande interesse em polímeros sintéticos, como observa-se pelo grande número de artigos relacionados a esse respeito. Em 1982 cerca de 1100 artigos a respeito deste assunto foram publicados (ISACSSON e LU, 1995).

Fritz et al. (1992) apud Isacson e Lu (1995) definem asfalto modificado como sendo aquele obtido pela incorporação de materiais termoplásticos, resinas sintéticas termorrígidas, borracha em pó ou elastômeros.

Segundo Brûlé (1996), na França, em 1963, foi construída uma pista de testes para determinar o comportamento do asfalto modificado com vários tipos de borrachas naturais e sintéticas. Os resultados destes testes não foram satisfatórios, o que demonstrou necessidade de novas pesquisas. Em 1972, o governo incentivou pesquisas para o desenvolvimento de asfaltos modificados com polímeros termoplásticos. Segundo Ramos et al. (1996), a França aplica anualmente cerca de 200.000 toneladas de asfalto modificado por polímero (8% do consumo total de CAP na pavimentação).

O uso do asfalto modificado por polímeros no Brasil teve impulso quando, em 1988, o Instituto de Pesquisa Rodoviária do Departamento de Estradas de Rodagem (IPR/DNER), iniciou estudos nesta área. A primeira experiência de campo foi realizada em 1990, na cidade do Rio de Janeiro, na rua Leopoldo Bulhões, que apresentava altas deflexões e muitas trincas. O resultado deste trecho experimental foi satisfatório; após quatro anos de uso, a parcela da via com asfalto modificado por

polímero apresentava excelentes condições, enquanto que a outra parcela com asfalto convencional, após um ano, apresentava excessivo trincamento (MARTINHO et al., 1994 e RAMOS et al., 1996). Outra experiência com bons resultados foi produzida no Autódromo Internacional “Nelson Piquet”, onde utilizou-se asfalto modificado com polímero, do tipo SBS, na camada de rolamento (RAMOS et al., 1996).

No começo dos anos 60, o asfalto borracha foi originalmente utilizado como um material para reparo de trincamento por fadiga em pavimentos do Arizona. Mais tarde foi utilizado como SAMI¹⁰ (*Stress-Absorbing Membrane Interlayer*) para reabilitação e recapeamento de pavimentos trincados (MORRIS et al., 1982).

A razão para o uso de asfaltos modificados por polímeros é o aumento no nível do desempenho em campo quanto à deformação permanente e ao trincamento por fadiga (CARPENTER e VANDAM, 1987 e ISACSSON e LU, 1995).

Pode-se observar o crescimento do uso de asfalto modificado por borracha nos EUA, pois segundo Takallou e Hicks (1988), em 1979 apenas 1 projeto foi desenvolvido utilizando asfalto modificado por borracha, onde aplicou-se 90 toneladas de mistura asfáltica, e em 1986 foram aplicadas 38370 toneladas de mistura asfáltica com asfalto-borracha.

Em 20 trechos experimentais construídos entre 1979 e 1986, nos EUA, os valores médios do teor de asfalto, teor de borracha, temperatura da mistura asfalto-borracha, tempo de mistura, temperatura de compactação e volume de vazios foram 7,7; 3,0; 166; 30; 160 e 4,8 respectivamente.

Segundo Isacsson e Lu (1995), o principal uso dos asfaltos modificados irá ser para aplicações especiais, tal como:

- paradas de ônibus e áreas de estacionamento de caminhões;
- pontes;
- túneis;
- aeroportos e
- SAMI, entre outros.

¹⁰ Entre a superfície do revestimento velho e o recapeamento, aplica-se esta camada com grande quantidade de borracha, que possui baixa rigidez e alta deformabilidade, para reduzir a transferência de tensões, com objetivo de eliminar as trincas por reflexão.

2.4.1. Polímeros

Polímero é uma macromolécula que contém centenas ou milhares de átomos, formada por sucessivas ligações de um ou dois, ou ocasionalmente mais, tipos de pequenas moléculas em cadeia ou estruturas de rede. O processo de polimerização pode ser obtido através de dois mecanismos: adição ou condensação (HALL¹¹, 1985 apud ISACSSON e LU, 1995).

Algumas propriedades que os polímeros devem possuir quando utilizados como modificadores de asfalto são: serem compatíveis com o asfalto, resistirem à degradação nas temperaturas de mistura do asfalto, fornecerem menor susceptibilidade térmica e serem processados por equipamentos convencionais de mistura e aplicação (ISACSSON e LU, 1995).

2.4.1.1. Classificação dos polímeros

Os polímeros podem ser classificados em quatro categorias: plásticos, elastômeros, fibras e aditivos. Os plásticos são subdivididos em termoplásticos e termorrígidos e os elastômeros em borracha natural e sintética (ISACSSON e LU, 1995).

Os termoplásticos são caracterizados pelo amolecimento quando aquecidos e endurecimento quando resfriados. Como exemplos deste grupo pode-se citar: polietileno, polipropileno, poliestireno, cloreto de polivinila (PVC) e etileno vinil acetato (EVA). O EVA é o termoplástico mais utilizado como modificador por possuir boa compatibilidade com a maioria dos asfaltos e ser estável em temperaturas de mistura e aplicação. Estes materiais quando misturados ao asfalto, aumentam sua viscosidade e rigidez nas temperaturas de serviço (ISACSSON e LU, 1995).

Os termo-rígidos são produzidos pela formação direta de redes de polímeros através de monômeros. Estes materiais não podem ser retornados a fluidos pelo aquecimento por possuírem uma forte estrutura de rede tridimensional e não são aplicados em pavimentação pelo alto custo. Como exemplos tem-se: poliésteres insaturados, poliuretanos e epóxis.

¹¹ HALL, C. (1985). Polymer Materials. Macmillian, London.

Os elastômeros possuem a propriedade de recuperar, parcialmente ou totalmente, após tensões de carregamento ou aumento de temperatura. Entre estes incluem-se: borracha natural, polibutadieno, copolímero estireno butadieno (SBR) e o estireno butadieno estireno (SBS), muito utilizado como modificador de asfalto.

As fibras podem ser separadas em naturais ou sintéticas. As fibras podem ser naturais, como por exemplo a celulose, ou sintéticas, como o polipropileno, o poliéster e o poliuretano, entre outros. O principal uso das fibras é como aditivo para mastiques industriais impermeabilizantes.

2.4.1.2. Polímero estireno-butadieno-estireno (SBS)

O uso do copolímero SBS como modificador de asfalto foi desenvolvido pela Shell Chemical Company, nos anos 60.

Segundo Ceratti et al. (1996), o polímero SBS é constituído de blocos de poliestireno e polibutadieno ligados quimicamente, apresentando forte interação com a base betuminosa por ser compatível com seus componentes aromáticos e não aromáticos. Conforme Valkering et al.¹² (1991) apud Ceratti et al. (1996), quando o SBS é disperso no asfalto aquecido, os domínios de poliestireno dissolvem-se, adquirindo características termoplásticas, que facilitam as operações de mistura e compactação. Ao resfriar, os blocos de poliestireno reassociam-se, formando uma rede tridimensional dispersa numa matriz de polibutadieno, conferindo propriedades de resistência e elasticidade à mistura.

De acordo com DNER (1998), “os domínios poliestirênicos se fundem acima dos 90°C e os domínios polibutadiênicos só se tornam rígidos próximo a – 90°C. Nos locais onde as temperaturas são elevadas, ultrapassando muito o ponto de amolecimento do CAP puro, quando ele se apresenta com fluxo praticamente viscoso, o SBS forma uma malha que envolve o ligante fluido, mantendo alta consistência no sistema devido ao estado ainda sólido dos domínios estirênicos; só a partir da fusão completa dos domínios estirênicos é que a mistura passa a ter fluxo viscoso. Nos locais onde as temperaturas são mais baixas, o CAP puro teria comportamento vítreo com trincamento correspondente. A adição de polímero SBS

¹² VALKERING, C. P. (1991). Cariflex TR in bitumen for asphalt mixes: improved elastic recovery and higher performance. *Thermoplastic Rubbers Technical Manual TR 8.23*. Shell Chemicals.

diminui bastante o ponto de ruptura Fraass da mistura, conferindo elasticidade até uma temperatura bem abaixo daquela correspondente à ruptura vítrea do CAP puro. Com a elevação do ponto de amolecimento juntamente com a diminuição do ponto de ruptura Fraass do CAP, a presença do copolímero SBS aumenta consideravelmente o intervalo de plasticidade, o que significa uma diminuição pronunciada da susceptibilidade térmica.”

Esse copolímero combina as propriedades elásticas e termoplásticas e é freqüentemente chamado de borracha termoplástica. A natureza termoplástica do SBS em elevadas temperaturas e sua capacidade de fornecer uma rede contínua em temperaturas baixas, melhorando sua flexibilidade, são as razões para sua grande atratividade como modificador de asfalto (ISACSSON e LU, 1995).

Segundo Corté et al. (1994) o uso de asfalto modificado com SBS claramente melhora a resistência à deformação permanente das misturas asfálticas.

Valkering et al. (1990), asseguram que o primeiro objetivo da adição do copolímero SBS é aumentar a estabilidade mecânica das misturas asfálticas para suportar os efeitos do aumento das cargas do tráfego. Ainda de acordo com Valkering et al. (1990), a modificação do asfalto com SBS, em concentrações de 3 a 7 %, corresponde à redução da profundidade das trilhas de roda de 60 a 70 %, quando medidas a 50°C. Esta característica é comprovada também através de ensaios de fluência por compressão uniaxial estática e dinâmica, feitos por Srivastava et al. (1992) e ensaios de compressão uniaxial dinâmica executados por Ceratti et al. (1996).

Além das propriedades citadas anteriormente, Srivastava et al. (1992) ressaltam ainda melhora de outras, tais como: resistência à radiação ultravioleta, adesividade, viscosidade e não sensibilidade às tensões térmicas. Khosla (1991) afirma que a adição de polímero SBS aumenta a resistência às trincas causadas por baixas temperaturas e melhora o módulo de resiliência em altas temperaturas sem afetá-lo adversamente nas baixas temperaturas.

2.4.2. Borracha de pneus

Os primeiros trabalhos de adição de borracha em pavimentos asfálticos foram feitos não com a intenção de eliminar os pneus usados, mas para melhorar o desempenho do pavimento (CHOUBANE et al., 1999).

Mas nos fins dos anos 80 nos EUA, Heitzman (1992) explica a ênfase ao desenvolvimento de tecnologia para o uso de asfalto modificado com borracha solucionar um problema ambiental de resíduo sólido: os pneus usados.

O crescimento do montante de pneus descartados foi visto como uma fonte de borracha de baixo custo para preparação de ligante asfalto borracha. Experimentos mostraram que esses pneus poderiam ser moídos e misturados ao asfalto quente, em grandes porcentagens, para produzir um material que tem propriedades superiores ao asfalto comum (HUFF e VALLERGA, 1981).

Segundo Heitzman (1992), os EUA descartam por ano aproximadamente 285 milhões de pneus, mais de 1 pneu/pessoa/ano. Deste total, 33 milhões são recauchutados, 22 milhões são reusados (revendidos), 42 milhões são aplicados em várias outras atividades e os 188 milhões restantes são adicionados a estoques, aterros sanitários ou dispostos de maneira ilegal em todo o país.

O passivo ambiental de pneus no Brasil, segundo dados das fabricantes, Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (Ibama) e Fundação Nacional de Saúde (Funasa), está entre 110 e 150 milhões de pneus. E anualmente, são descartados cerca de 36 milhões de pneus (ECOLOGIA EM NOTÍCIAS URGENTE, 2002).

Num esforço para limpar os estoques de pneus usados e promover a reciclagem dos pneus descartados nos dias atuais, muitos organismos rodoviários estão avaliando o uso de pneus descartados para modificar misturas asfálticas (M.B. TAKALLOU e H.B. TAKALLOU, 1991).

Em 1991, a seção 1038 da Lei sobre a Eficiência do Transporte Intermodal de Superfície nos EUA, estabeleceu quantidades mínimas para utilização de asfalto modificado por borracha de pneus (HANSON et al., 1994): a exigência de utilização mínima de pavimento asfáltico contendo borracha reciclada como uma porcentagem das toneladas totais de asfalto aplicado, será (a) 5 por cento para o ano de 1994; (b)

10 por cento para o ano de 1995; (c) 15 por cento para o ano de 1996; e (d) 20 por cento para o ano de 1997 e para cada ano posterior.

No Brasil, o Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), segundo a resolução de nº 258/99, de 26 de agosto de 1999, determina os prazos para coleta e destinação final, de forma ambientalmente adequada, de pneus descartados:

“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.”

Asfalto borracha não é a solução para o problema do descarte de pneus, mas quando utilizado, melhora as características tais como durabilidade, flexibilidade e resistência ao trincamento e contribui significativamente para a redução de pneus descartados (CARLSON e ZHU, 1999).

Além do uso em pavimentação os pneus têm sido utilizados para controle de erosão em canais de drenagem, para estabilizar taludes de rodovias, como barreira de proteção contra colisão, para fabricação de brinquedos de parques infantis, como quebra-mar, para a confecção de tapetes, de adesivos, de novos pneus, além de outras aplicações. Pneus inteiros são usados como combustível em uma usina termoelétrica em Modesto, na Califórnia, onde os pneus são queimados a uma taxa de 700/h ou

cerca de 4,5 milhões de pneus/ano para produção de energia elétrica (PAGE et al., 1992).

Os dois principais mercados para os pneus descartados são: uso como combustível e modificador de asfalto (HEITZMAN, 1992). Segundo Carlson e Zhu (1999), a queima de um pneu gera aproximadamente 4,40 kWh (15000 BTU), enquanto que para a fabricação de um, são necessários 8,8 kWh (30000 BTU).

Muitos órgãos ambientais questionam a queima dos pneus por causa da emissão de gases poluentes, mas as emissões dos equipamentos e instalações que o processo de fabricação de asfalto borracha produzem são muito menores que as emissões de um incêndio fora de controle em depósitos de pneus (CARLSON e ZHU, 1999).

Charania et al. (1991) comentam que nos anos de 1989 e 1990 aproximadamente 3000 t de borracha reciclada de pneus foram usadas em aproximadamente 965 km (600 milhas) de recapeamento. Este processo requereu a moagem de cerca de 600.000 pneus velhos e ajudou a eliminar grandes depósitos de pneus. O uso de pneus velhos em misturas asfálticas ajuda a prevenir a poluição e mantém boa qualidade ambiental. Desde 1971, Phoenix pavimentou aproximadamente 5794 km (3600 milhas) usando cerca de 3,6 milhões de pneus descartados.

Aproximadamente 480 milhões de toneladas de asfalto são aplicados por ano nos EUA. Se apenas 10% deste total fossem de asfalto modificado por borracha com aplicação de 3% de borracha, todos os pneus descartados por ano poderiam ser consumidos (M.B. TAKALLOU e H.B. TAKALLOU, 1991).

Os estoques de pneus oferecem habitats ideais para vermes e procriação de mosquitos. Se estes estoques inflamarem-se, não apenas contaminarão o solo, mas esforços para extinguir o fogo podem também causar contaminação das águas do lençol freático (M.B. TAKALLOU e H.B. TAKALLOU, 1991).

Atualmente a maior parte dos pneus são constituídos de 10% de borracha natural (látex), 30% de borracha sintética e 60% de aço e tecidos. Um pneu de aproximadamente 9 kg (20lb) produz cerca de 4,5 a 5,5 kg de borracha moída. O restante do pneu são tecidos e aço (HEITZMAN, 1992).

Vários processos são utilizados para a moagem da borracha de pneus usados. Os dois mais comuns são (M.B. TAKALLOU e H.B. TAKALLOU, 1991):

- com a retirada da banda de rodagem do pneu para posterior recauchutagem, o resíduo formado é livre de fibras e aços, resultando num material que apenas deve ser moído e separado nas faixas granulométricas desejadas e
- o processamento do pneu inteiro em temperatura ambiente, onde ele é triturado em partículas de várias graduações. O aço é retirado por separação magnética e as fibras por meio de um sistema a vácuo.

Os processos utilizados na moagem dos pneus influem na forma, na textura e em algumas propriedades físicas das partículas de borracha. Partículas com maior superfície específica e mais irregulares produzem asfalto borracha com maiores viscosidades (WEST et al., 1998).

Dois principais processos de incorporação de borracha moída para uso em pavimentação são aplicados. Estes métodos distinguem-se entre os processos “seco” e “úmido”. No processo seco, a borracha moída é aplicada à mistura asfáltica para substituir algumas granulometrias dos agregados da mistura. O processo úmido adiciona a borracha moída ao asfalto para modificar suas propriedades físicas e químicas. A aplicação e compactação dos asfaltos modificados por borracha usam os mesmos equipamentos que as misturas com asfalto convencional (M.B. TAKALLOU e H.B. TAKALLOU, 1991).

2.4.3. Propriedades do asfalto modificado

O asfalto ideal (figura 2.3), conforme ressalta Brûlé (1996), é aquele que tem grande coesão, baixa susceptibilidade térmica na faixa de temperatura de serviço e baixa viscosidade nas temperaturas de execução do pavimento, pequena susceptibilidade ao tempo de carregamento, alta resistência à fadiga e grande resistência ao envelhecimento, tanto na execução como durante sua vida em serviço.

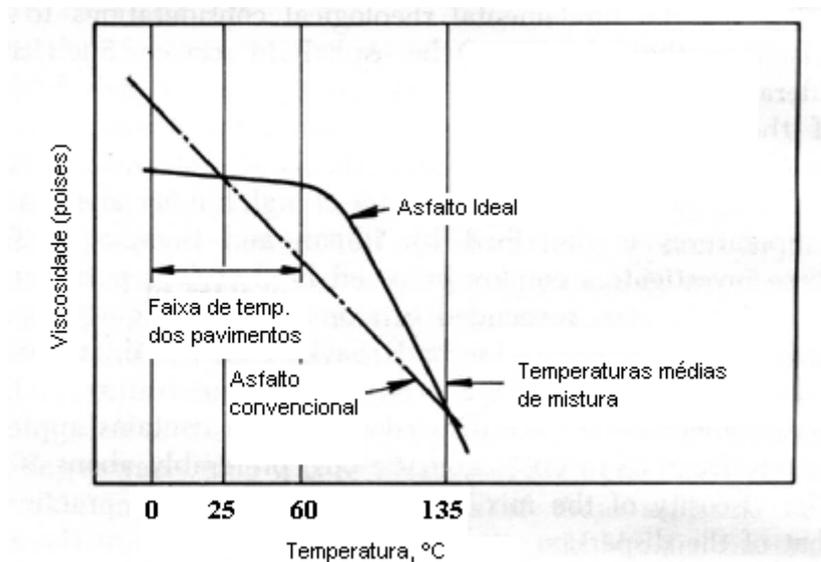


Figura 2.3 - Temperatura versus viscosidade para asfaltos convencionais e para o asfalto ideal (BRÛLÉ, 1996).

Por anos, engenheiros e químicos têm trabalhado para adicionar borracha natural (látex) e borracha sintética (polímero) ao asfalto com o objetivo de melhorar as suas propriedades elásticas. A borracha de pneus, um composto de borracha natural e sintética, está sendo aplicada para este fim (HEITZMAN, 1992).

A maioria dos ensaios utilizados para medir as propriedades dos asfaltos convencionais podem ser aplicados para asfaltos modificados, embora Isacson e Lu (1995) atentem para o fato de que as propriedades elásticas do asfalto modificado não podem ser medidas através dos ensaios corriqueiros. Mas como os ensaios tradicionais (ponto de amolecimento, ponto de fulgor, penetração) tem sido utilizados há muito tempo, criou-se um conhecimento baseado em seus resultados, portanto, é provável que não deixarão de ser usados. Outras razões que contribuem para a contínua utilização destes ensaios são a facilidade de execução e o baixo custo (ISACSSON e LU, 1995).

As propriedades do asfalto modificado são dependentes das características do polímero e do asfalto, da quantidade de polímero e do processo de manufatura (LU e ISACSSON, 1997). Existe uma complexa relação entre a composição química dos

asfaltos, sua estrutura coloidal e suas propriedades físicas e reológicas. Qualquer elemento que modifique sua composição química, certamente modificará sua estrutura e, conseqüentemente, suas propriedades (BRÛLÉ, 1996).

Segundo Thompson (1969), a adição de borracha ao asfalto melhora a resistência à fratura, reduz a susceptibilidade térmica, aumenta o ponto de amolecimento, melhora a adesividade, aumenta a estabilidade (resistência à deformação) e, o que é mais evidente, melhora as propriedades elásticas. Nas misturas asfálticas a melhora é percebida pela maior resistência às trincas e aumento da estabilidade. Com a adição de borracha é possível aumentar a quantidade de asfalto na mistura, sem afetar a estabilidade. Este aumento no teor de asfalto resulta em misturas que resistem melhor ao trincamento e ao envelhecimento.

Charania et al. (1991) observaram que a adição de borracha ao asfalto torna a superfície do pavimento melhor em termos de dirigibilidade e reduz o barulho gerado pelo tráfego.

Quanto maior a viscosidade do asfalto a 60°C, maior a resistência da mistura asfáltica à deformação permanente, portanto, a viscosidade absoluta a 60°C é particularmente importante pois representa a consistência do asfalto em altas temperaturas de operação, em que a mistura asfáltica é geralmente menos rígida e mais fraca (KAMEL e MILLER, 1994). A adição de borracha e polímero tem um grande efeito na viscosidade do asfalto, principalmente na taxa de mudança da viscosidade com a temperatura (susceptibilidade térmica). Nas altas temperaturas de serviço das rodovias, a borracha aumenta a viscosidade do asfalto e, em baixas temperaturas, a viscosidade é diminuída, propiciando asfaltos menos frágeis (THOMPSON, 1969).

A adição de polímero e de borracha causa diminuição na penetração e aumento no ponto de amolecimento. De posse destes dados é possível calcular o índice de penetração (IP), que segundo Salter e Mat (1990), tem sido considerado um bom indicador da susceptibilidade térmica do ligante asfáltico. Os valores do índice de penetração mostram que asfaltos modificados por polímeros são menos susceptíveis à mudança de temperatura que os asfaltos convencionais. Os asfaltos modificados produzem um concreto asfáltico de maior dureza em altas temperaturas e menor rigidez em temperaturas baixas, resultando em concretos asfálticos com

maior resistência à deformação permanente em altas temperaturas e às trincas térmicas em temperaturas baixas (CARPENTER e VANDAM, 1987). Barth (1962), observou que a adição de 1 a 2% de borracha aumentou o índice de penetração (IP), mas para que melhores mudanças reológicas ocorressem, seria necessária adição em quantidades maiores.

Em estudo de Hanson et al. (1994), verifica-se, também, que os asfaltos modificados resistem melhor à deformação permanente, pois observou-se que a densificação ocorre mais rapidamente em misturas convencionais (asfalto comum).

Verga et al. (1974) concluíram, através de resultados de ensaios, que o concreto asfáltico com asfaltos modificados por borracha tem menor tendência à deformação durante grandes períodos de aplicação de carga, isto significa maior resistência à deformação permanente. Também concluíram que a melhor resistência à fadiga do asfalto modificado deve-se ao aumento da rigidez.

No início dos anos 60 foi desenvolvido um sistema de adição de borracha de pneus usados ao asfalto, com 25% de borracha moída e 75% de asfalto. Este método, quando aplicado como SAMI (*stress-absorbing membrane interlayer*), controla as trincas por reflexão. Outra vantagem do uso deste sistema é que esta camada se torna impermeável, protegendo as camadas inferiores do pavimento (MORRIS e McDONALD, 1976).

Existe diferença entre misturas feitas com asfalto modificado por borracha de pneus de veículos de passeio e borracha de pneus de caminhões, devido à constituição química (SHULER, 1982). Acredita-se, também, que a adição de antioxidantes aos pneus para o aumento da resistência ao envelhecimento contribua para uma maior durabilidade do asfalto borracha (HUFF e VALLERGA, 1981).

A adição de borracha reciclada ao asfalto aumenta a flexibilidade da mistura através de dois diferentes mecanismos. O asfalto modificado é menos sensível à temperatura, então um tipo de asfalto menos viscoso pode ser utilizado; o outro mecanismo igualmente importante é o aumento da espessura da película (STEPHENS, 1982). Hanson et al. (1994) explicam que a absorção de óleos aromáticos do asfalto pelas cadeias de polímero da borracha moída aumenta a viscosidade do asfalto modificado, o que pode ser observado devido aos menores valores de penetração e maiores viscosidades absolutas e cinemáticas.

Esch (1982) diz que o módulo resiliente e a durabilidade ao tempo do concreto asfáltico têm sido melhorados com a adição de borracha, isto indica um aumento na vida de fadiga e um melhor controle das trincas por reflexão no recapeamento devido ao aumento da flexibilidade.

CAPÍTULO 3

MATERIAIS E MÉTODOS

3.1.INTRODUÇÃO

Neste capítulo são apresentados os materiais, suas características físicas e origens, e os métodos utilizados na pesquisa para confecção e avaliação das misturas asfálticas.

Utilizou-se, nesta pesquisa, a técnica de planejamento de experimentos fatoriais fracionários, com o objetivo de reduzir a quantidade de ensaios gerados pelo grande número de fatores envolvidos: três tipos de asfalto, duas faixas granulométricas, dois tipos de ensaios, três corpos-de-prova por ensaio, três tensões para cada ensaio e cinco teores de asfalto, o que resultaria em 540 combinações. Embora os efeitos da interação de alguns fatores possam ser confundidos com os efeitos de fatores isoladamente, a análise da influência do tipo de asfalto e da distribuição granulométrica para um tipo de agregado quanto à resistência à deformação permanente não deverá ser prejudicada.

3.2.AGREGADOS

3.2.1. Tipo e distribuição granulométrica

Os agregados utilizados nesta pesquisa são oriundos da pedreira Bandeirantes, localizada na zona rural do município de São Carlos, SP (Estrada do 29, SN). São de natureza basáltica e foram manipulados para serem enquadrados nos centros das faixas B e C do DNER-ES 313/97 (1997).

Para faixa B do DNER, decidiu-se não utilizar o material passado na peneira de abertura de 38,1 mm e retido na de abertura de 25,4 mm, pois como esses

agregados têm grandes dimensões, a massa de um agregado, em alguns casos, ultrapassa a quantidade necessária para a confecção de um corpo-de-prova.

Os limites das faixas granulométricas B e C do DNER são apresentados nas tabelas 3.1 e 3.2, respectivamente.

Tabela 3.1 – Faixa granulométrica B do DNER-ES 313/97.

FAIXA B (DNER)			
Abertura mm	% Passando em peso		
	Limite Inferior	Centro da faixa	Limite Superior
38,1	100,00	100,00	100,00
25,4	95,00	97,50*	100,00
19,1	80,00	90,00	100,00
12,7	62,50	76,25	90,00
9,5	45,00	62,50	80,00
4,8	28,00	44,00	60,00
2,0	20,00	32,50	45,00
0,42	10,00	21,00	32,00
0,18	8,00	14,00	20,00
0,074	3,00	5,50	8,00

*A especificação é 97,5%, mas como mencionado anteriormente, no experimento utilizou-se 100%.

Tabela 3.2 – Faixa granulométrica C do DNER-ES 313/97.

FAIXA C (DNER)			
Abertura mm	% Passando em peso		
	Limite Inferior	Centro da faixa	Limite Superior
38,1	100,00	100,00	100,00
25,4	100,00	100,00	100,00
19,1	100,00	100,00	100,00
12,7	85,00	92,50	100,00
9,5	75,00	87,50	100,00
4,8	50,00	67,50	85,00
2,0	30,00	52,50	75,00
0,42	15,00	27,50	40,00
0,18	8,00	19,00	30,00
0,074	3,00	6,50	10,00

Nas figuras 3.1 e 3.2 são apresentadas as distribuições granulométricas adotadas no trabalho (faixas B e C, respectivamente) juntamente com as zonas de restrição da especificação “Superpave”, onde pode-se notar que as curvas centrais de cada faixa granulométrica “passam” acima das respectivas zonas de restrição.

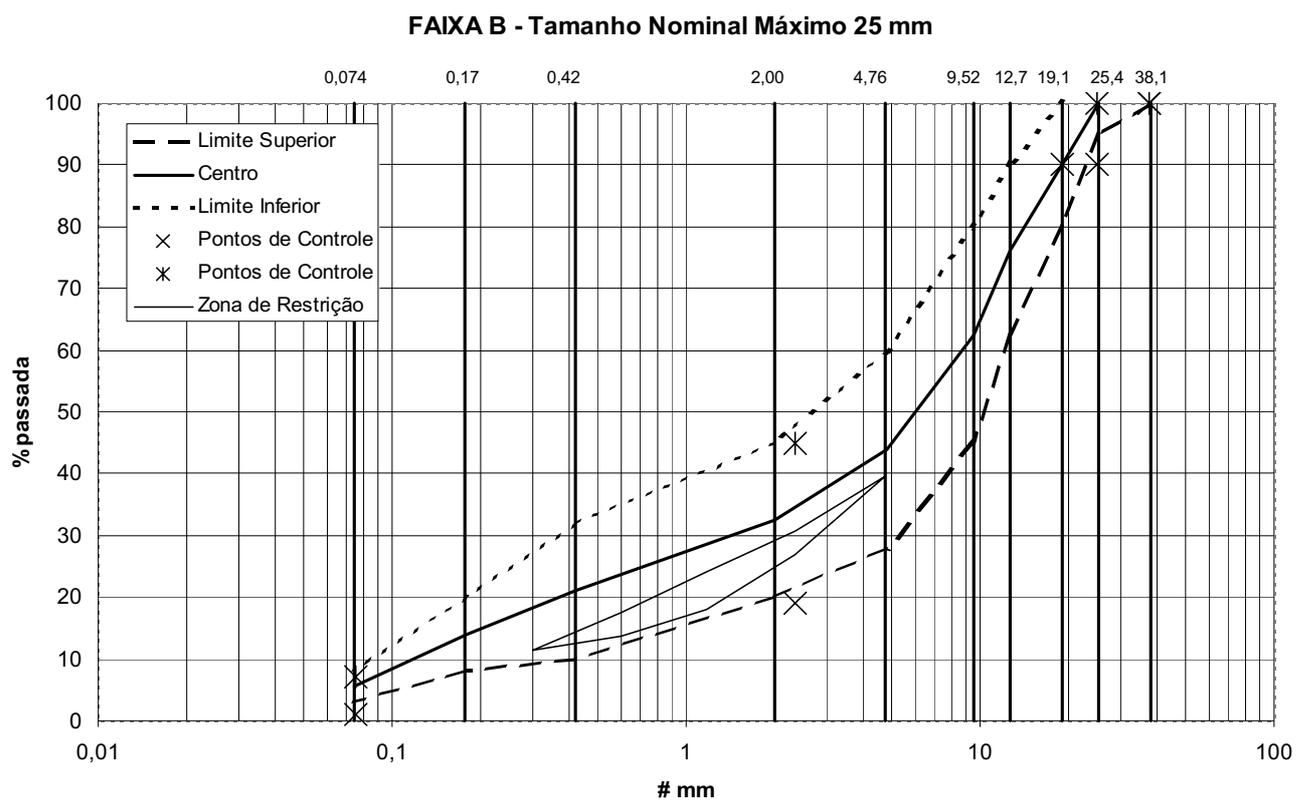


Figura 3.1 – Faixa granulométrica B do DNER e zona de restrição da especificação “Superpave”.

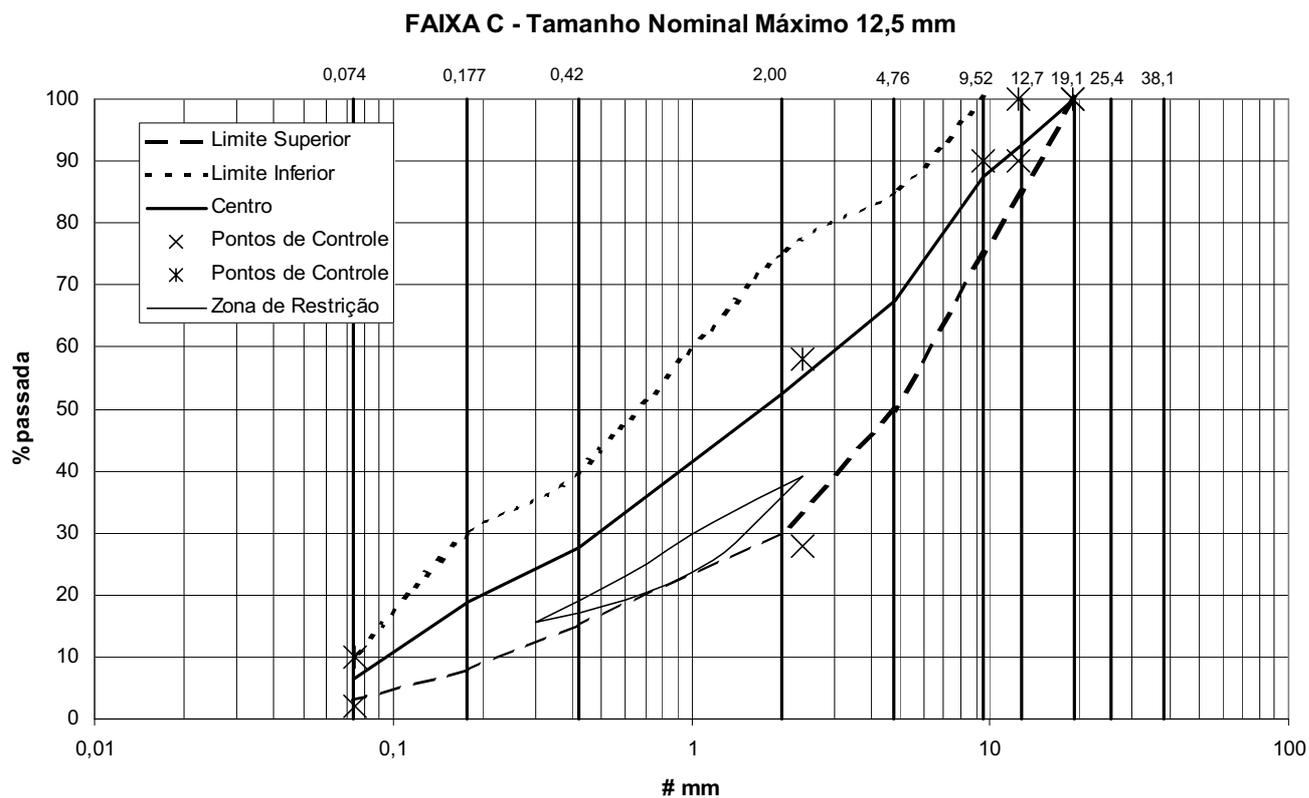


Figura 3.2 – Faixa granulométrica C do DNER e zona de restrição da especificação “Superpave”.

3.2.2. Características físicas

Os agregados pétreos foram submetidos ao ensaio de abrasão Los Angeles (DNER – ME 35/98) em três graduações: B, C e D, sendo ensaiadas três amostras por graduação. Os resultados obtidos encontram-se na tabela 3.3, de onde conclui-se que o agregado atende à especificação do DNER, que estabelece desgaste igual ou inferior a 40%.

Tabela 3.3 – Resultados dos ensaios de abrasão Los Angeles do agregado.

Abrasão Los Angeles (%)				
Graduação	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Média
B	21,30	21,38	21,28	21,32
C	23,98	24,34	24,40	24,24
D	29,04	28,66	27,90	28,53

Além dos ensaios de peneiramento e abrasão Los Angeles, os agregados foram submetidos aos ensaios de peso específico (DNER – ME 84/95), adesividade do ligante ao agregado graúdo (DNER – ME 78/94) e adesividade do ligante ao agregado miúdo (DNER – ME 79/94). Os resultados são mostrados na tabela 3.4.

Tabela 3.4 – Resultados dos ensaios de peso específico, adesividade do ligante ao agregado graúdo e adesividade do ligante ao agregado miúdo.

Ensaio	Resultado
Peso específico	2,872 g/cm ³
Adesividade do ligante ao agregado graúdo	não satisfatório
Adesividade do ligante ao agregado miúdo	má

3.2.3. Procedimento de seleção, manuseio e preparação do agregado

Os agregados coletados na pedreira foram previamente secos em estufa por no mínimo 12 h (Figura 3.3); posteriormente separados manualmente nas peneiras especificadas e lavados com água corrente até a peneira de abertura de 0,42 mm, para eliminação do excesso de finos. Para a operação de lavagem dos agregados foi improvisado um suporte de peneira com o uso de um tripé de teodolito (Figura 3.4).



Figura 3.3 – Secagem do agregado em estufa.



Figura 3.4 – Lavagem do agregado gráudo para eliminação do excesso de finos.

Após a separação nas diversas peneiras, lavagem e posterior secagem, os agregados foram colocados em pequenos sacos plásticos, com material necessário para a confecção de 1 corpo-de-prova cada (ver tabelas 3.9 e 3.10).

3.3. ASFALTOS

3.3.1. Tipos

Neste trabalho foram utilizados três tipos de asfaltos, provenientes da Continental Asfaltos S.A.: CAP-20, CAP-20 com 4,5% de polímero SBS e CAP-20 com 20% de borracha. Para a confecção dos outros asfaltos modificados foi utilizado como base o mesmo CAP-20.

3.3.2. Características físicas

Os resultados dos ensaios de caracterização dos asfaltos são apresentados nas tabelas 3.5, 3.6 e 3.7.

Tabela 3.5 – Resultados dos ensaios de caracterização do asfalto convencional.

CAP-20	
Característica	Resultado
Penetração, 25° C, 5s, 100 g	5,4 mm
Ponto de amolecimento	48°C
Índice de susceptibilidade térmica	-1,534
Viscosidade Saybolt Furol a 135°C	189 s
Viscosidade Saybolt Furol a 177°C	30 s
Viscosidade absoluta a 60°C	2102 p
Solubilidade no tricloroetileno	99,5%
Dutilidade a 25°C	96 cm
Ponto de fulgor	256 °C

Tabela 3.6 – Resultados dos ensaios de caracterização do asfalto modificado por polímero SBS.

CAP-20 com 4,5% de polímero SBS	
Característica	Resultado
Penetração, 25° C, 5s, 100 g	4,7 mm
Ponto de amolecimento	67,5°C
Índice de susceptibilidade térmica	2,262
Viscosidade Saybolt Furol a 135°C	402 s
Viscosidade Saybolt Furol a 177°C	68 s
Viscosidade absoluta a 60°C	1640 p
Ponto de fulgor	278°C

Tabela 3.7 – Resultados dos ensaios de caracterização do asfalto modificado por borracha.

CAP-20 com 20% de borracha	
Característica	Resultado
Penetração, 25° C, 5s, 100 g	0,1 mm
Ponto de amolecimento	104°C
Índice de susceptibilidade térmica	3,615
Viscosidade Saybolt Furol a 135°C	não possível
Viscosidade Saybolt Furol a 177°C	840 s
Viscosidade Saybolt Furol a 185°C	98 s
Viscosidade absoluta a 60°C	7358 p
Ponto de fulgor	241°C

Observando-se os dados apresentados nas tabelas 3.5 a 3.7 nota-se que a adição de polímero e de borracha causam diminuição na penetração e aumento no ponto de amolecimento, isto é, a susceptibilidade térmica do ligante asfáltico diminui.

3.4. CONFEÇÃO DOS CORPOS-DE-PROVA

3.4.1. Dosagem Marshall

Para a dosagem pelo método Marshall (ABNT 12891), foram necessários 90 corpos-de-prova, pois foram testadas duas faixas granulométricas e três tipos de asfalto, com a confecção de três corpos-de-prova para cada um dos cinco teores de asfalto da dosagem.

Os resultados da dosagem Marshall são mostrados no capítulo 4.

3.4.2. Composição dos corpos-de-prova

Nas tabelas 3.8 e 3.9 encontram-se as porcentagens e massas de cada fração granulométrica dos agregados para confecção de corpos-de-prova com distribuição granulométrica nos centros das faixas B e C do DNER, respectivamente.

Tabela 3.8 – Porcentagens e massa de cada fração do agregado para o centro da faixa B do DNER.

FAIXA B (DNER)			
Abertura (mm)		% do material	Massa do material (g)
Passado	Retido		
38,1	25,4	-	-
25,4	19,1	10	120
19,1	12,7	16	192
12,7	9,52	11	132
9,52	4,76	19	228
4,76	2,00	11	132
2,00	0,42	12	144
0,42	0,177	7	84
0,177	0,074	9	108
0,074	fundo	5	60
Total		100	1200

Tabela 3.9 – Porcentagens e massa de cada fração do agregado para o centro da faixa C do DNER.

FAIXA C (DNER)			
Abertura (mm)		% do material	Massa do material (g)
Passado	Retido		
38,1	25,4	-	-
25,4	19,1	-	-
19,1	12,7	7	84
12,7	9,52	6	72
9,52	4,76	20	240
4,76	2,00	14	168
2,00	0,42	26	312
0,42	0,177	8	96
0,177	0,074	12	144
0,074	fundo	7	84
Total		100	1200

3.4.3. Temperaturas de mistura e compactação

3.4.3.1. Temperaturas de mistura e compactação do asfalto convencional (CAP-20).

A especificação de serviço DNER-ES 313/97 (1997) estabelece que a temperatura conveniente de mistura do cimento asfáltico convencional é aquela na qual o asfalto apresenta viscosidade entre 75 e 150 segundos Saybolt-Furol, devendo-se dar preferência para viscosidades entre 85 e 95 segundos; entretanto, a temperatura do ligante não deve ser inferior a 107 °C nem superior a 177 °C. Para a compactação da mistura essa especificação recomenda temperaturas em que o ligante apresente viscosidade Saybolt-Furol entre 140 ± 15 segundos.

A NBR 12891/1993 (1993), que foi a utilizada neste trabalho, estabelece que a temperatura do ligante para ser misturado com os agregados é aquela que corresponde a viscosidade Saybolt-Furol de 85 ± 10 segundos. A temperatura especificada para a compactação é mesma indicada pela especificação de serviço citada anteriormente (DNER-ES 313/97, 1997).

Com os dados apresentados na tabela 3.5 construiu-se o gráfico apresentado na figura 3.5, que permite determinar as temperaturas de mistura e compactação do ligante asfáltico.

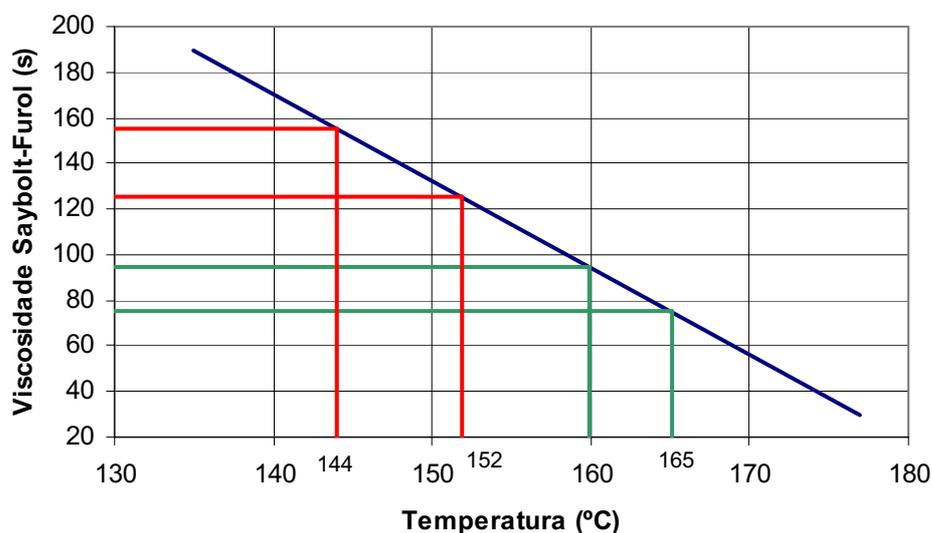


Figura 3.5 – Viscosidade Saybolt-Furol versus temperatura para o asfalto convencional (CAP-20).

Da figura 3.5, verifica-se que a temperatura de mistura do CAP-20 deve estar compreendida entre 160 °C e 165 °C, e que a de compactação deve situar-se entre 144 °C e 152 °C.

3.4.3.2. Temperaturas de mistura e compactação do asfalto modificado por polímero SBS.

Para asfaltos modificados por polímero a especificação de serviço DNER-ES 385/99 (1999) recomenda que as temperaturas de aquecimento do ligante e de compactação da mistura devem ser estabelecidas em função do teor de polímero, isto é, a temperatura de aquecimento do ligante deve ser de 150 °C acrescida de 3 °C para cada 1% de polímero não excedendo 180 °C e, para a compactação, a temperatura recomendada é 140 °C acrescida de 3 °C para cada 1% de polímero. Entretanto, nesta pesquisa, a temperatura de aquecimento situou-se entre 174 °C e 176 °C e a de

compactação entre 166 °C e 170 °C, para trabalhar-se na mesma faixa de viscosidade do asfalto convencional conforme pode-se observar através da figura 3.6, que foi construída com os dados da tabela 3.6.

Segundo DNER-ES 385/99 (1999) os agregados devem ser aquecidos de 10 °C a 15 °C acima da temperatura do asfalto-polímero e no máximo a 183 °C.

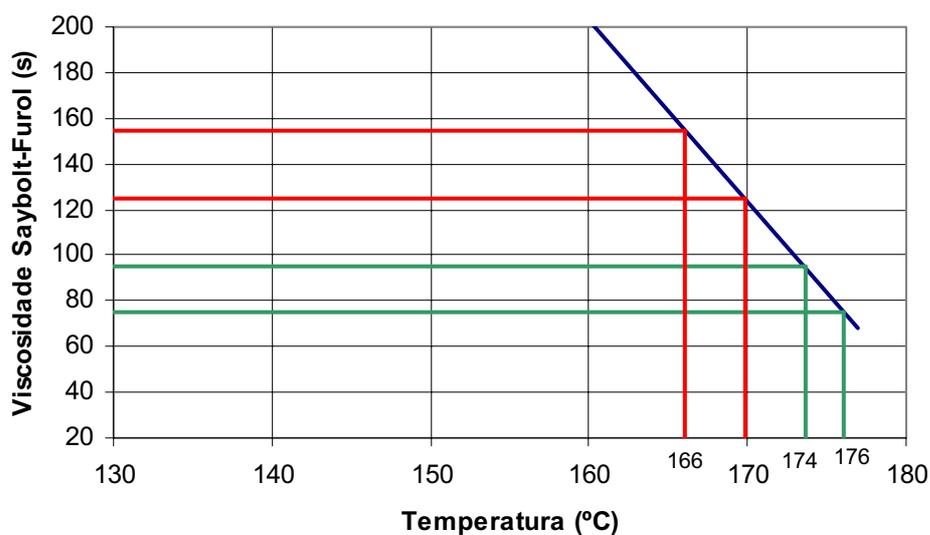


Figura 3.6 – Viscosidade Saybolt-Furol versus temperatura para o asfalto modificado por polímero SBS.

3.4.3.3. Temperaturas de mistura e compactação do asfalto modificado por borracha

Com os valores das viscosidades Saybolt-Furol do asfalto modificado por borracha apresentados na tabela 3.7, construiu-se a figura 3.7.

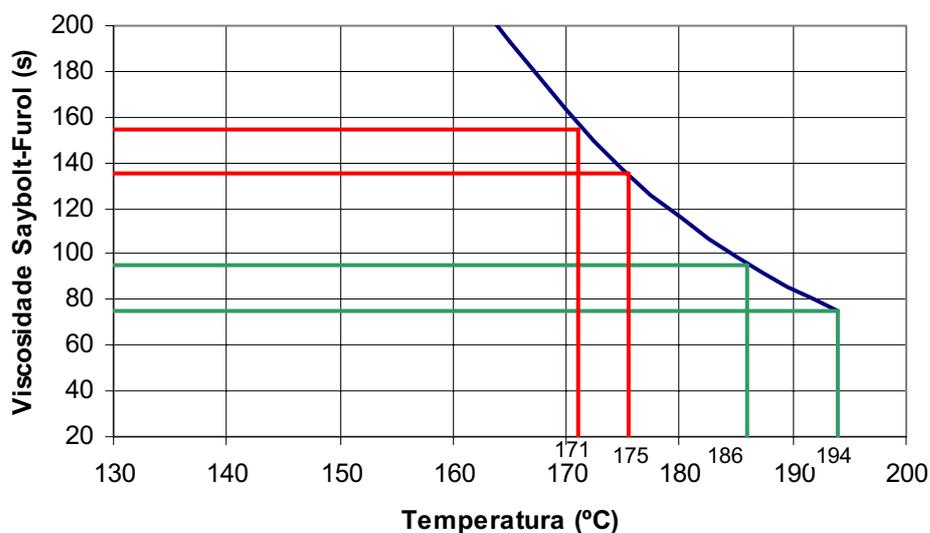


Figura 3.7 – Viscosidade Saybolt-Furol versus temperatura para o asfalto modificado por borracha.

Seguindo-se o mesmo princípio adotado para os outros dois asfaltos (mesmas faixas de viscosidade), as temperaturas de aquecimento do asfalto modificado por borracha para mistura e compactação, situam-se entre 186 °C e 194 °C e entre 171 °C e 175 °C, respectivamente.

3.4.4. Compactação e cuidados posteriores

Os corpos-de-prova foram moldados segundo o método Marshall (ABNT 12891, 1993) utilizando energia de compactação de 75 golpes por face, recomendada para pressão de pneu entre 686,5 kPa a 1373 kPa.

Após a compactação, os corpos-de-prova foram resfriados à temperatura ambiente dentro dos cilindros, com o objetivo de não se deformarem durante o processo de extração do molde.

Para a determinação da densidade, os corpos-de-prova foram revestidos com parafina (figura 3.8), antes da pesagem imersa, com o intuito de evitar a entrada de água nos vazios.



Figura 3.8 – Corpos-de-prova revestidos com parafina para determinação da densidade.

3.5. ENSAIOS DE COMPRESSÃO UNIAXIAL

3.5.1. Equipamentos e programas

O equipamento utilizado para a realização dos ensaios de fluência uniaxial estática e dinâmica consiste de uma prensa pneumática, uma célula de carga, dois LVDTs, um relé programável (uma espécie de CLP) utilizado para comandar o carregamento da prensa pneumática, sistema de aquecimento ligado a um sensor de temperatura e um microcomputador para a aquisição de dados da célula de carga e dos LVDTs (figura 3.9).

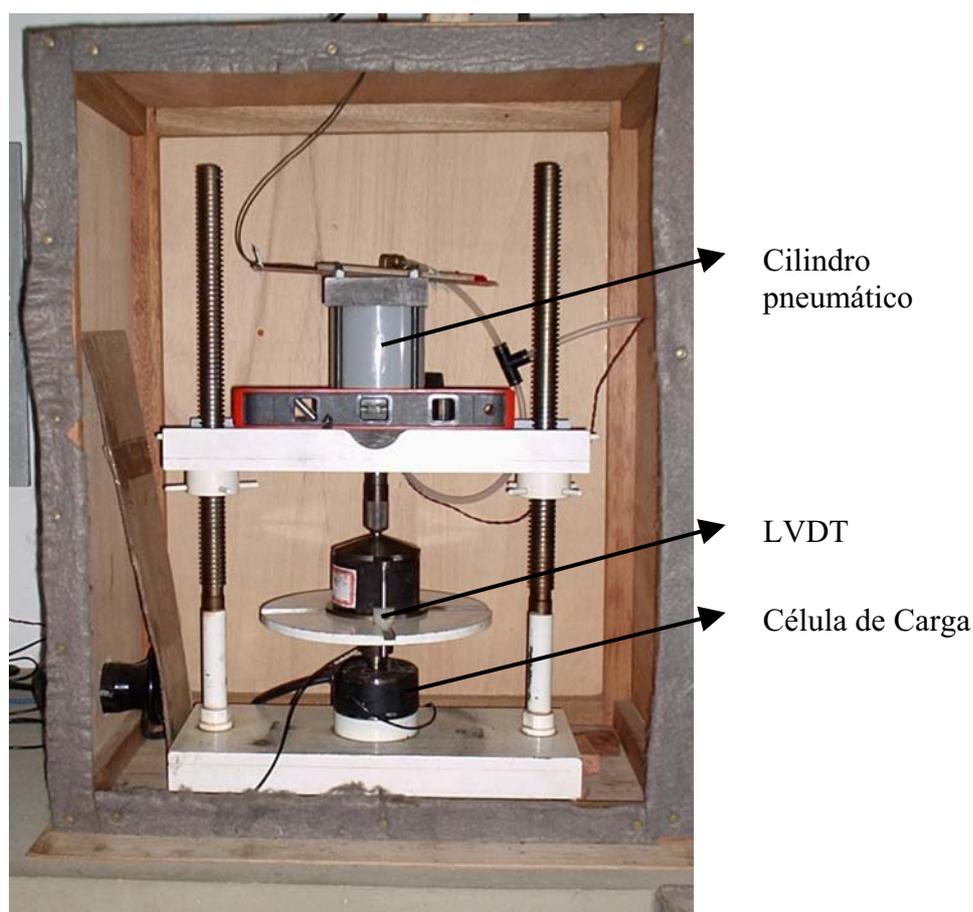


Figura 3.9 – Partes dos equipamentos utilizados para realização dos ensaios de fluência estática e dinâmica.

O programa utilizado para a aquisição dos dados foi desenvolvido em LabView, versão 6.0 para Windows. Neste programa é possível a visualização do gráfico deslocamento x tempo e carga x tempo (figuras 3.10 e 3.11) durante a execução do ensaio.

Durante o ensaio, o programa gera um arquivo texto onde são armazenados os dados do corpo-de-prova, as constantes de calibração e as leituras, em Volts, dos dois LVDTs e da célula de carga.

Para o ensaio de fluência por compressão uniaxial estática, a taxa de aquisição de dados foi de 10 leituras por segundo, por canal, e para o ensaio de fluência por compressão uniaxial dinâmica foi de 100 leituras por segundo, por canal.

As constantes de calibração dos LVDTs e da célula de carga, que permitem transformar as leituras de Volts para milímetros ou para kgf, são determinadas com o auxílio de um outro programa de calibração, também confeccionado em LabView.

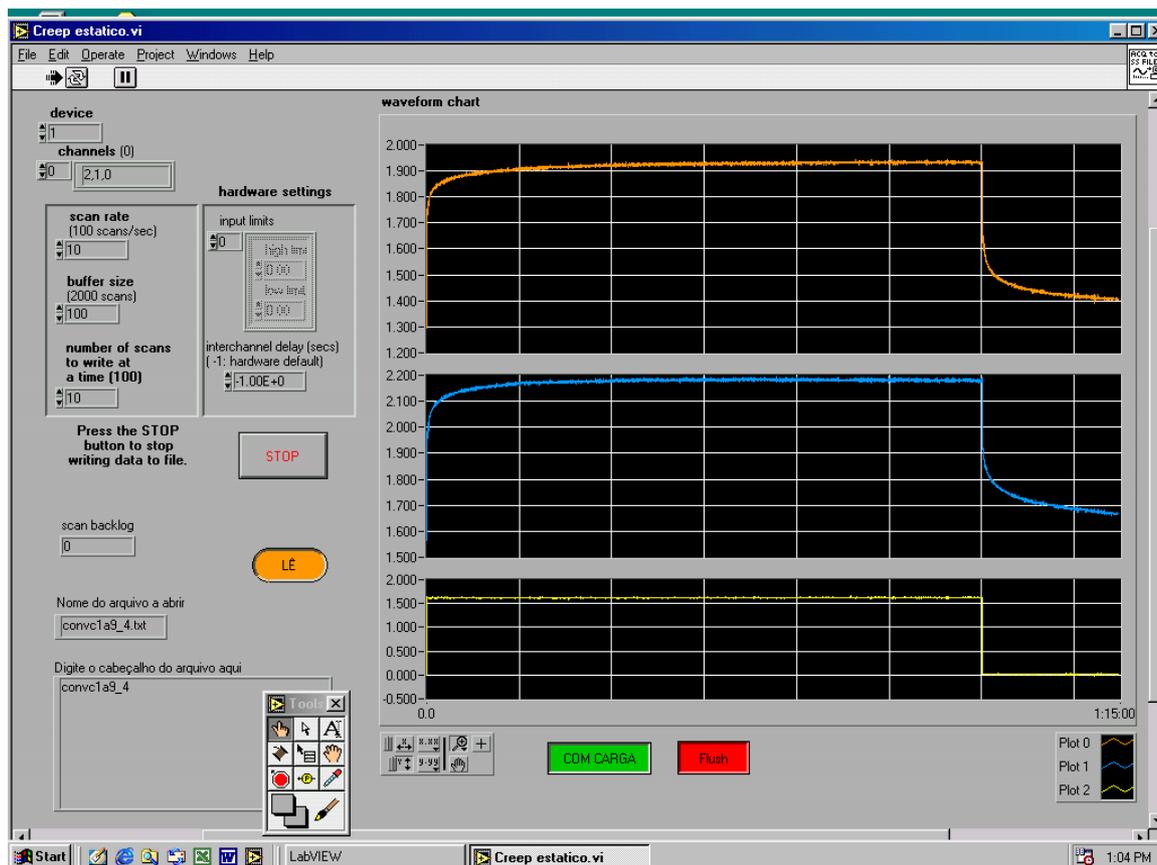


Figura 3.10 – Exemplo de tela do programa com os gráficos deslocamento x tempo e carga x tempo para ensaio de fluência por compressão uniaxial estática.

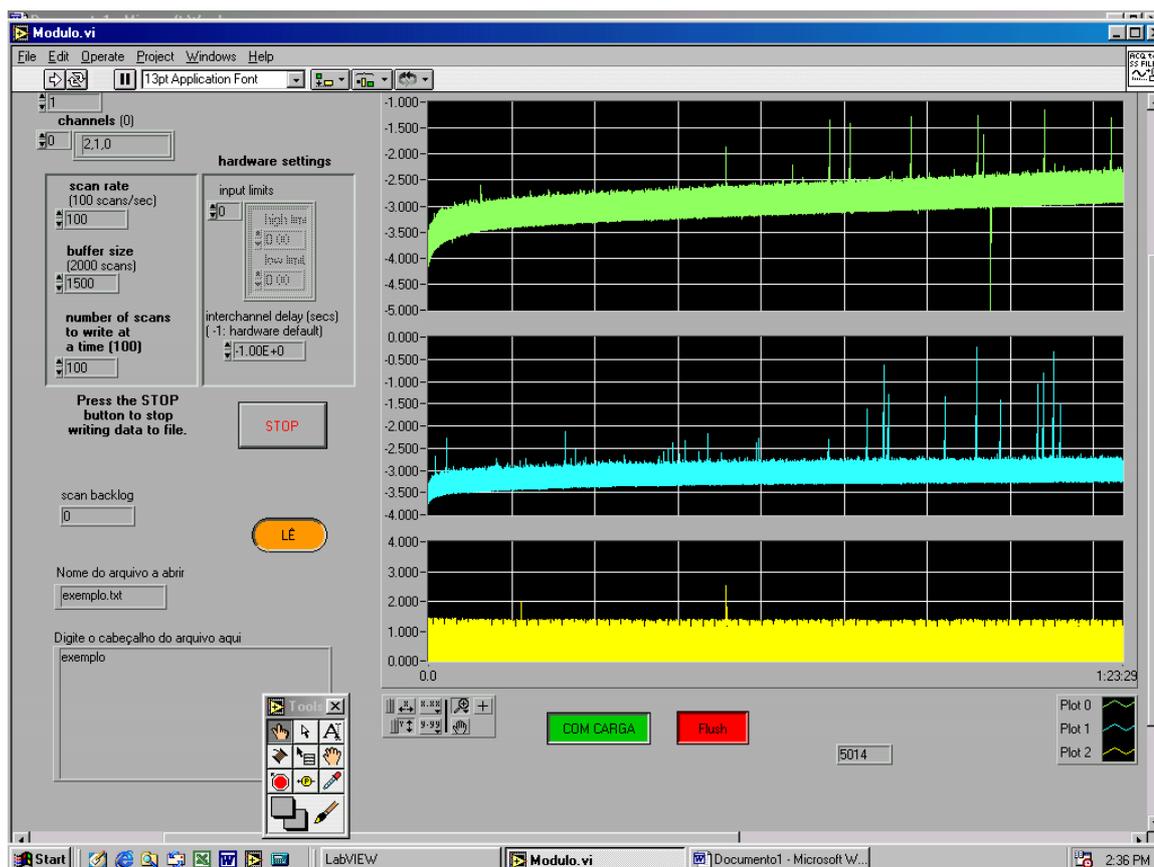


Figura 3.11 – Exemplo de tela do programa com os gráficos deslocamento x tempo e carga x tempo para ensaio de fluência por compressão uniaxial dinâmica.

3.5.2. Ensaio de fluência por compressão uniaxial estática

Este ensaio consiste da aplicação de uma carga de compressão estática durante 60 minutos, em um corpo-de-prova cilíndrico, e posterior descarregamento durante 15 minutos para obtenção dos valores da deformação total, deformação recuperável, deformação não recuperável, recuperação, módulo de fluência e inclinação da curva de fluência. A aquisição dos dados ocorre durante todo o período do ensaio, tanto na fase de carregamento, como na fase de recuperação.

Como exemplo, apresenta-se na Figura 3.12 uma curva deformação \times tempo, construída com dados obtidos de um ensaio de fluência por compressão uniaxial estática. A partir dos dados de deslocamento fornecidos pelos dois LVDTs, determinou-se o deslocamento médio sofrido pelo corpo de prova. As deformações

foram obtidas dividindo-se os deslocamentos ocorridos pela altura média do corpo de prova.

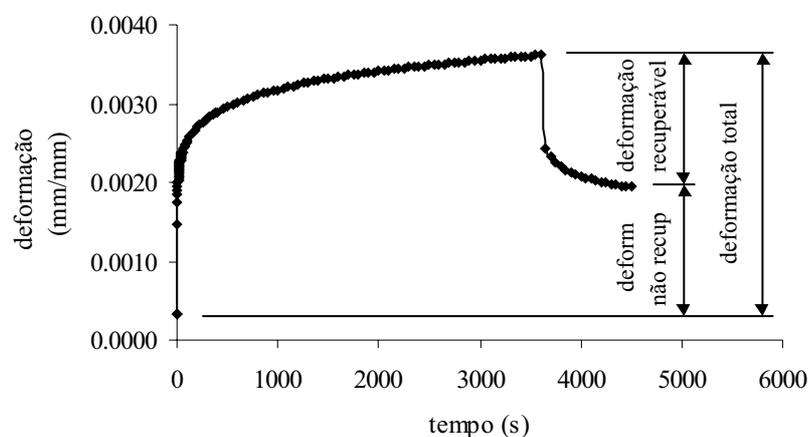


Figura 3.12 – Exemplo de uma curva deformação \times tempo fornecida pelo ensaio de fluência por compressão uniaxial estática.

As tensões utilizadas nesta pesquisa foram de 0,1 MPa (1 kgf/cm²), 0,4 MPa (4 kgf/cm²) e 0,7 MPa (7 kgf/cm²).

3.5.2.1. Preparação dos corpos-de-prova

As faces dos corpos-de-prova foram lixadas para regularização e, posteriormente, uma fina camada de vaselina foi aplicada nas superfícies para evitar o atrito entre o corpo-de-prova e as placas de carregamento e de apoio do equipamento.

Os corpos-de-prova foram pré-aquecidos na temperatura do ensaio, 40 °C, em estufa, por um período de no mínimo 4 horas. Antes da execução do ensaio, os corpos-de-prova foram submetidos a um pré-condicionamento de 10 minutos, onde, durante 5 minutos, aplicou-se a tensão do ensaio, e nos 5 minutos restantes procedeu-se a um período de recuperação.

3.5.2.2. Aquisição de dados e processamento dos resultados

O processamento dos resultados dos ensaios de fluência por compressão uniaxial estática foi desenvolvido através de outro programa em LabView, como mostrado na figura 3.13. Este programa lê o arquivo texto gerado durante o ensaio, transforma as leituras de Volt para mm, calcula a deformação final, a deformação recuperável, a deformação total, a recuperação, a inclinação do trecho entre 1000 s e 3600 s e os módulos de fluência para 3600 s e 4500 s utilizando-se a média das leituras obtidas nos dois LVDT's e grava estes resultados num arquivo texto.

Posteriormente os resultados obtidos foram tratados no programa Microsoft Excel.



Figura 3.13 – Exemplo de tela do programa do processamento dos resultados do ensaio de fluência por compressão uniaxial estática.

3.5.3. Ensaio de fluência por compressão uniaxial dinâmica

Este ensaio é similar ao ensaio estático descrito anteriormente, entretanto, como o próprio nome evidencia, o carregamento é feito através de pulsos de carga, que possuem duração de 0,1 s intercalados de um tempo de repouso de 0,9 s, num total de 5000 pulsos.

O equipamento e as tensões utilizadas neste ensaio foram os mesmos utilizados no ensaio de fluência por compressão uniaxial estática.

3.5.3.1. Preparação dos corpos-de-prova

Os corpos-de-prova foram preparados da mesma maneira que os do ensaio de fluência por compressão uniaxial estática, apenas diferindo no pré-condicionamento, que consiste da aplicação de 200 ciclos de carregamento com a tensão do ensaio.

3.5.3.2. Aquisição dos dados e processamento dos resultados

Como explicado anteriormente, o programa desenvolvido em LabView, gera um arquivo texto com as leituras dos dois LVDTs e da célula de carga.

O processamento dos resultados dos ensaios de fluência por compressão uniaxial dinâmica também foi desenvolvido através do auxílio de outro programa em LabView (figura 3.14), que calcula a deformação final, a inclinação do trecho entre 100 s e 5000 s e o módulo de fluência para 5000 s, onde, posteriormente, os resultados obtidos foram tratados no programa Microsoft Excel.

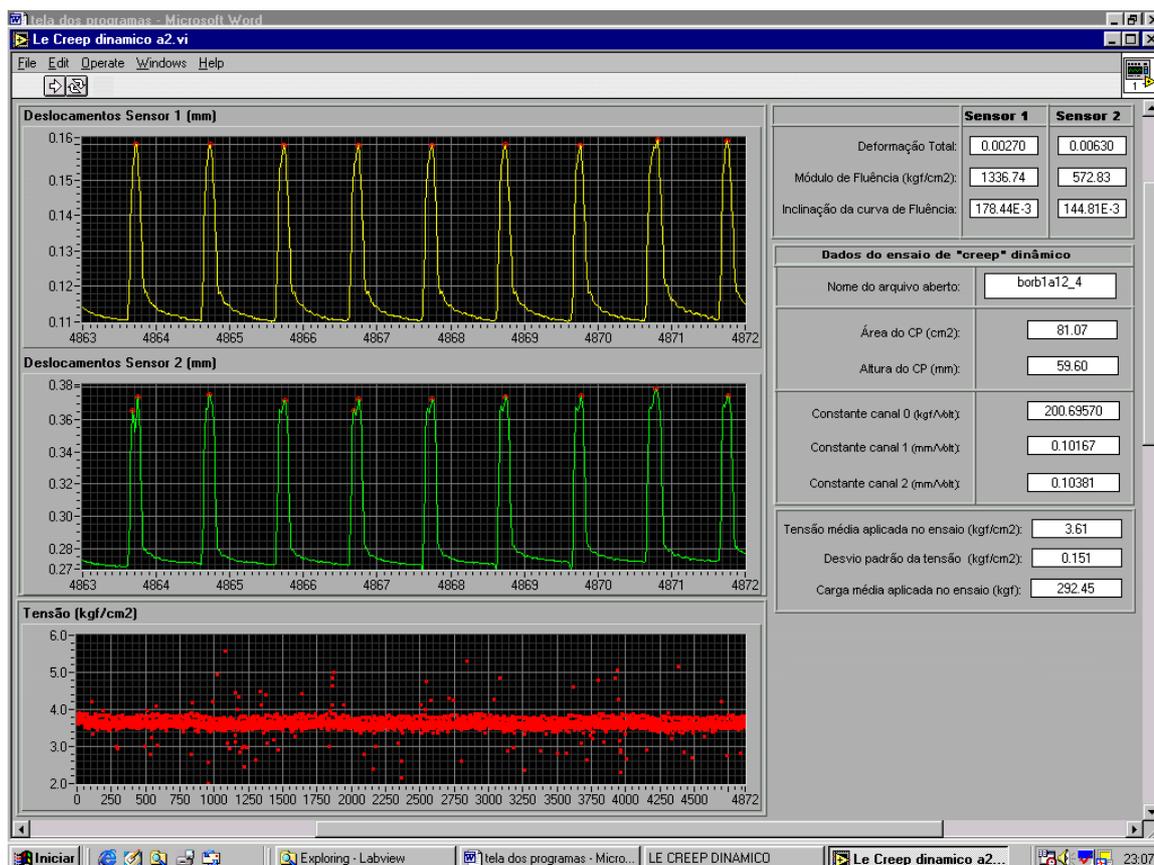


Figura 3.14 – Exemplo de tela do programa do processamento dos resultados do ensaio de fluência por compressão uniaxial dinâmica.

3.5.4. Planejamento de Experimentos Fatoriais

Nesta pesquisa valeu-se do planejamento de experimentos fatoriais fracionários com o objetivo de diminuir o número de ensaios, gerados pela grande quantidade de fatores incluídos no estudo.

No planejamento de experimentos fatoriais decidiu-se por trabalhar com 4 teores de asfalto e não 5, como previsto anteriormente, para que a quantidade de ensaios pudesse ser reduzida a um número possível de ser realizado no tempo disponível.

Para a realização do planejamento do experimento fatorial inicialmente definiram-se as variáveis independentes e seus respectivos números de níveis. Neste

trabalho, as variáveis independentes consideradas foram os tipos de asfalto, as faixas granulométricas, os teores de asfalto e as tensões de ensaio. Os números de níveis em que essas variáveis foram consideradas são, respectivamente, 3, 2, 4 e 3. O experimento descrito envolveria 72 condições experimentais, resultantes da combinação de três tipos de asfalto, 2 distribuições granulométricas com quatro teores de asfalto e três tensões de ensaio, ou seja $3 \times 2 \times 4 \times 3$.

Adicionado às 72 condições experimentais tem-se dois tipos de ensaio de fluência e três corpos de prova para cada condição, resultando em $72 \times 2 \times 3 = 432$ ensaios, o que tornaria quase impraticável a realização do experimento completo, considerando-se o tempo disponível para a realização da dissertação. Assim, realizou-se o fracionamento do experimento em 4/9, resultando em $72 \times 4/9 = 32$ condições experimentais, o que significa a realização de $32 \times 2 \times 3 = 192$ ensaios.

Na tabela 3.10 apresentam-se os níveis e as nomenclaturas dos fatores presentes neste trabalho. Os fatores com mais de dois níveis foram identificados pelas letras A, B ou C, sendo cada um deles representados por dois fatores auxiliares em dois níveis, indicados pela letra X seguida por um número. Dessa forma, o fator distribuição granulométrica, com dois níveis de variação, foi denominado por X1. o fator teor de asfalto (fator A), com quatro níveis de variação, foi representado por dois fatores em dois níveis X2 e X3. Os fatores tensão utilizada nos ensaios de fluência (fator B) e tipo de asfalto (fator C), ambos com três níveis de variação, foram representados por pares de fatores em dois níveis, X4, X5 e X6, X7, respectivamente.

Tabela 3.10 – Níveis e nomenclatura dos fatores presentes nesta pesquisa.

Nomenclatura	Fatores	Níveis
X1	Distribuição granulométrica	2
A (X2 + X3)	Teor de asfalto	4
B (X4 + X5)	Tensão utilizada nos ensaios de fluência	3
C (X6 + X7)	Tipo de asfalto	3

No planejamento de experimentos fatoriais, um experimento composto de variáveis com níveis diversos torna-se complexo. Para torná-lo mais simples e prático, nesta pesquisa, utilizou-se o artifício de transformar cada fator com mais de

dois níveis de variação em dois fatores em dois níveis, seguindo-se a associação de níveis da tabela 3.11. Nessa tabela pode-se observar a transformação do fator A, com quatro níveis de variação, em dois fatores de dois níveis X2 e X3, e a transformação do fator B, com três níveis de variação, em dois fatores de dois níveis X4 e X5. A transformação do fator C, também com três níveis de variação, em dois fatores de dois níveis X6 e X7 segue a associação de níveis utilizada para o fator B.

Tabela 3.11 – Transformação dos fatores A e B, com quatro e três níveis de variação, em dois fatores de dois níveis, X1 e X2, e X3 e X4, respectivamente.

Fatores em dois níveis		Fator em quatro níveis	Fatores em dois níveis		Fator em três níveis
X2	X3	A	X4	X5	B
-	-	Nível 0	-	-	Nível 0
+	-	Nível 1	+	-	Nível 1
-	+	Nível 2	-	+	Nível 1
+	+	Nível 3	+	+	Nível 2

Dessa forma, o experimento fatorial completo $3 \times 2 \times 4 \times 3$ foi acomodado em um experimento em dois níveis com 2^7 condições experimentais.

Em seguida realizou-se o fracionamento do experimento. Para isso construiu-se um experimento completo 2^{7-2} com os fatores X1, X2, X3, X4 e X5, introduzindo-se os fatores X6 e X7 posteriormente. Assim foi construído um experimento envolvendo $2^5 = 32$ condições experimentais, introduzindo-se então ao experimento os fatores X6 e X7, que juntos compõe o fator C, sem que houvesse aumento do número de condições experimentais a serem testadas em laboratório. Para isso o fator X6 foi introduzido fazendo seus níveis coincidirem com a interação entre os fatores X2 X3 X4 X5, e o fator X7 foi introduzido fazendo seus níveis coincidirem com os níveis de interação entre os fatores X1 X2 X3 X4. Ou seja, os níveis dos fatores X6 e X7 serão ditados por interações entre os fatores X1, X2, X3, X4 e X5, utilizados para montagem do experimento 2^{7-2} . Isso permitirá que seja construído um experimento com um fator em dois níveis, um fator em quatro níveis e dois fatores em três níveis, utilizando-se apenas 32 condições experimentais.

Pode-se perceber que o fracionamento de experimento foi realizado com base em acoplamentos de efeitos, determinados pelas relações geradoras e pela relação

definidora do experimento. As relações geradoras desse experimento são $I = X_2 X_3 X_4 X_5 X_6 = A B C$ e $I = X_1 X_2 X_3 X_4 X_7 = X_1 A B C$. A relação definidora é obtida pelos geradores e pela multiplicação dos geradores entre si, obtendo-se nesse caso $I = 2 3 4 5 6 = 1 2 3 4 7 = 1 5 6 7$ ou $I = A B C = X_1 A B C = X_1 B C$. A partir da relação definidora determina-se a resolução do experimento, no caso igual a III, o que significa que o efeito principal dos fatores será confundido com efeitos de interação entre dois fatores.

Conhecida a relação definidora do experimento podem ser obtidos os padrões de acoplamento, que indicam os efeitos que estarão acoplados.

Efeitos acoplados são aqueles que não podem ser isolados, ou seja, não se saberá com clareza qual dos efeitos acoplados foi o principal causador da variação da resposta que está sendo medida. Os padrões de acoplamento do experimento em questão encontram-se apresentados na tabela 3.12.

Tabela 3.12 – Padrões de acoplamento de efeitos para o experimento $2 \times 4 \times 3 \times 3$.

Padrões de acoplamento
$X_1 = X_1 A B C = A B C = B C$
$A = B C = X_1 B C = X_1 A B C$
$B = A C = X_1 A C = X_1 C$
$C = A B = X_1 A B = X_1 B$
$X_1 A = X_1 B C = B C = A B C$
$X_1 B = X_1 A C = A C = C$
$X_1 C = X_1 A B = A B = B$
$A B = C = X_1 C = X_1 A C$
$A C = B = X_1 B = X_1 A B$
$B C = A = X_1 A = X_1$

A partir dos padrões de acoplamentos sabe-se, por exemplo, que o efeito da variação da tensão será confundido com o efeito da interação entre o teor de asfalto e o tipo de asfalto e que o efeito da variação do tipo de asfalto será confundido com o efeito da interação entre o teor de asfalto e a tensão utilizada.

A Tabela 3.13 mostra quais as condições de ensaio utilizadas nesta pesquisa.

Tabela 3.13 – Condições de ensaio realizadas neste trabalho.

		Teor							
		0		1		2		3	
		Faixa B	Faixa C						
Tensão de 0,1 MPa	Asfalto convencional								
	Asfalto com polímero								
	Asfalto com borracha								
Tensão de 0,4 MPa	Asfalto convencional								
	Asfalto com polímero								
	Asfalto com borracha								
Tensão de 0,7 MPa	Asfalto convencional								
	Asfalto com polímero								
	Asfalto com borracha								

Obs.: os teores de asfalto 0, 1, 2 e 3 para a faixa granulométrica B do DNER são, respectivamente, 4,0%, 4,5%, 5,0% e 5,5% e para a faixa granulométrica C do DNER são, respectivamente, 5,0%, 5,5%, 6,0% e 6,5%.

CAPÍTULO 4

APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

4.1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo são apresentados os resultados das dosagens Marshall (NBR 12891, 1993) para os três tipos de asfaltos (asfalto convencional, asfalto com adição de 4,5% de polímero SBS e asfalto com adição de 20% de borracha moída de pneu) e para as duas faixas granulométricas utilizadas (faixa B e C do DNER), além dos resultados dos ensaios de fluência por compressão uniaxial estática e dinâmica.

Dos ensaios de dosagem Marshall foram obtidos os valores de densidade aparente (DAP), volume de vazios (Vv), volume de betume (Vb), vazios do agregado mineral (VAM), relação betume-vazios (RBV), fluência (F) e estabilidade (E) em função do teor de asfalto.

Os parâmetros obtidos do ensaio de fluência por compressão uniaxial estática foram: deformação total (deformação no final da fase de carregamento), deformação recuperável (diferença entre a deformação total no final da fase de carregamento e a deformação no final da fase de descarregamento), deformação não recuperável (deformação final da fase de recuperação), recuperação, módulos de fluência (relação entre a tensão aplicada e a deformação permanente correspondente no corpo-de-prova) para os tempos de 3600 s e 4500 s e inclinação da curva de fluência entre os tempos de 1000 s e 3600 s.

Para o ensaio de fluência por compressão uniaxial dinâmica, os parâmetros obtidos foram: deformação final, inclinação da curva de fluência entre os tempos de 100 s e 5000 s e módulo de fluência para 5000 s.

4.2. DOSAGEM MARSHALL

Neste trabalho, a dosagem Marshall foi utilizada apenas para determinar os teores ótimos de trabalho para cada uma das misturas. O procedimento de ensaio foi o convencional, tendo sido moldados três corpos de prova para cada um dos cinco teores de asfalto utilizados em cada uma das seis dosagens.

Os valores ótimos médios, obtidos da dosagem Marshall, para a distribuição granulométrica B (DNER-ES 313/97, 1997) e para os três tipos de asfalto utilizados neste trabalho, estão apresentados nas tabelas 4.1 a 4.3.

Os gráficos de densidade aparente (DAP), volume de vazios (Vv), relação betume-vazios (RBV), fluência (F) e estabilidade (E) em função do teor de asfalto, para os três tipos de asfalto e para a distribuição granulométrica B (DNER) são apresentados nas figuras 4.1 a 4.5.

Tabela 4.1 – Valores médios dos parâmetros obtidos da dosagem Marshall para mistura com asfalto convencional e distribuição granulométrica B do DNER.

Teor (%)	DAP (g/cm ³)	Vv (%)	Vb (%)	VAM (%)	RBV (%)	F (mm)	E (N)	E/F (N/mm)
4,0	2,493	6,93	9,74	16,67	58,4	2,6	14901	5731
4,5	2,515	5,33	11,05	16,38	67,5	3,2	17805	5564
5,0	2,534	3,81	12,37	16,18	76,5	3,6	20165	5601
5,5	2,524	3,40	13,56	16,95	80,0	4,0	18863	4716
6,0	2,508	3,23	14,69	17,92	82,0	4,5	13839	3075

Tabela 4.2 – Valores médios dos parâmetros obtidos da dosagem Marshall para mistura com asfalto modificado por polímero SBS e distribuição granulométrica B do DNER.

Teor (%)	DAP (g/cm ³)	Vv (%)	Vb (%)	VAM (%)	RBV (%)	F (mm)	E (N)	E/F (N/mm)
4,0	2,493	6,94	9,74	16,68	58,4	3,2	16164	5051
4,5	2,516	5,27	11,06	16,33	67,7	3,5	18217	5205
5,0	2,536	3,74	12,38	16,12	76,8	3,8	20523	5400
5,5	2,522	3,49	13,54	17,03	79,5	4,1	18692	4559
6,0	2,510	3,14	14,71	17,85	82,4	4,3	16288	3787

Tabela 4.3 – Valores médios dos parâmetros obtidos da dosagem Marshall para mistura com asfalto modificado por borracha moída de pneu e distribuição granulométrica B do DNER.

Teor (%)	DAP (g/cm ³)	Vv (%)	Vb (%)	VAM (%)	RBV (%)	F (mm)	E (N)	E/F (N/mm)
4,0	2,486	7,16	9,73	16,89	57,7	3,1	13307	4293
4,5	2,517	5,24	11,08	16,32	68,0	3,6	14044	3901
5,0	2,534	3,78	12,40	16,18	76,6	4,0	14836	3709
5,5	2,524	3,38	13,58	16,97	80,1	4,1	13282	3240
6,0	2,506	3,28	14,71	17,99	81,8	4,5	12098	2688

Na figura 4.1 são apresentados os valores de densidade aparente, em g/cm³, versus o teor de asfalto, para cada tipo de asfalto utilizado na pesquisa e faixa B do DNER.

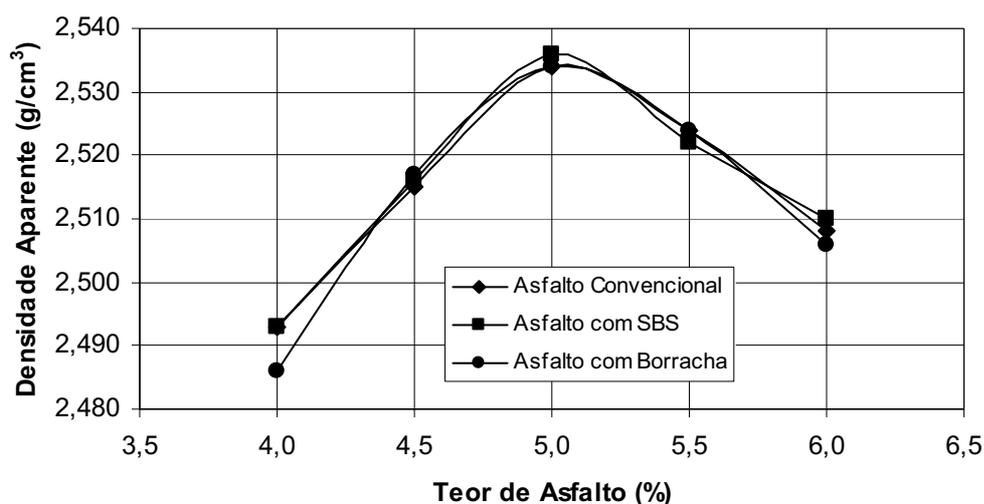


Figura 4.1 – Densidade aparente versus teor de asfalto para a mistura na distribuição granulométrica B do DNER.

Observando-se a figura 4.1 nota-se que os valores de densidade aparente observados para a distribuição granulométrica B são praticamente iguais para os três tipos de asfalto. Possivelmente, as maiores viscosidades dos asfaltos com polímero SBS e com borracha não influenciaram na compactação, por se tratar de uma faixa granulométrica menos densa ou mais aberta.

Tem-se, na figura 4.2, os valores de volume de vazios, em porcentagem, versus o teor de asfalto, para os três tipos de asfalto e para a distribuição granulométrica B do DNER.

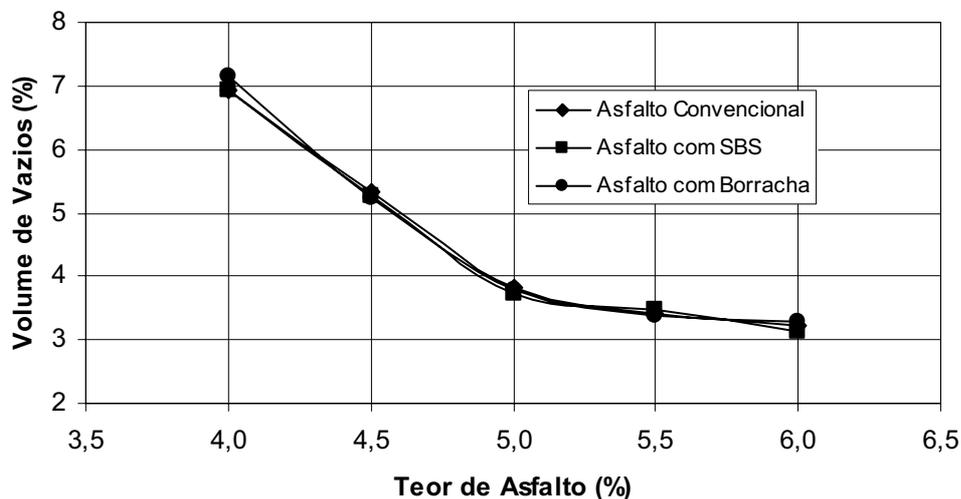


Figura 4.2 – Volume de vazios versus teor de asfalto para a distribuição granulométrica B do DNER.

Analisando-se a figura 4.2 nota-se que os valores de volume de vazios são também praticamente os mesmos, independente do tipo de asfalto utilizado na mistura, fato esperado devido à semelhança dos valores da densidade aparente.

Na figura 4.3 apresentam-se os valores da relação betume-vazios, em porcentagem, para a distribuição granulométrica B do DNER e para os três tipos de asfalto utilizados na pesquisa.

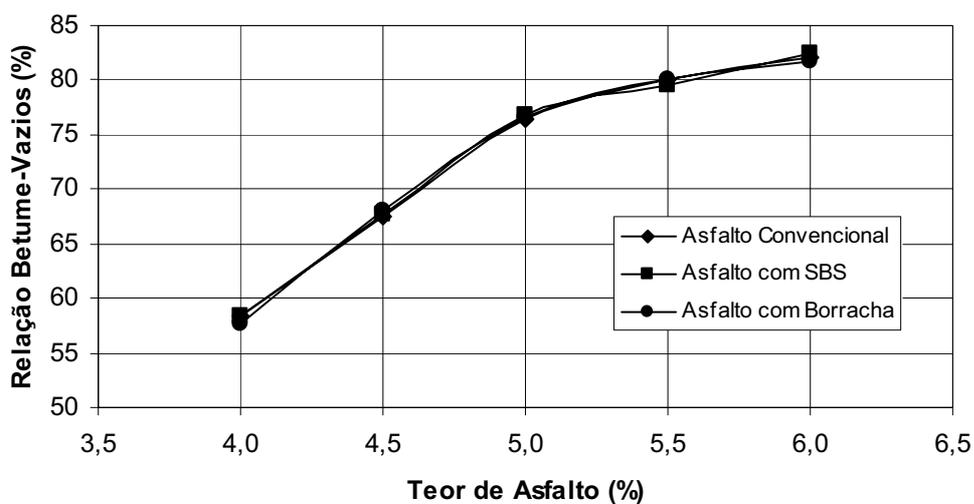


Figura 4.3 – Relação betume-vazios versus teor de asfalto para faixa B do DNER.

Na figura 4.3 nota-se que os valores da relação betume-vazios são muito próximos, fato decorrente dos valores semelhantes dos volumes de vazios para os três tipos de asfalto.

Apresentam-se, na figura 4.4, os valores de fluência, em mm, para a distribuição granulométrica B do DNER e para os três tipos de asfalto.

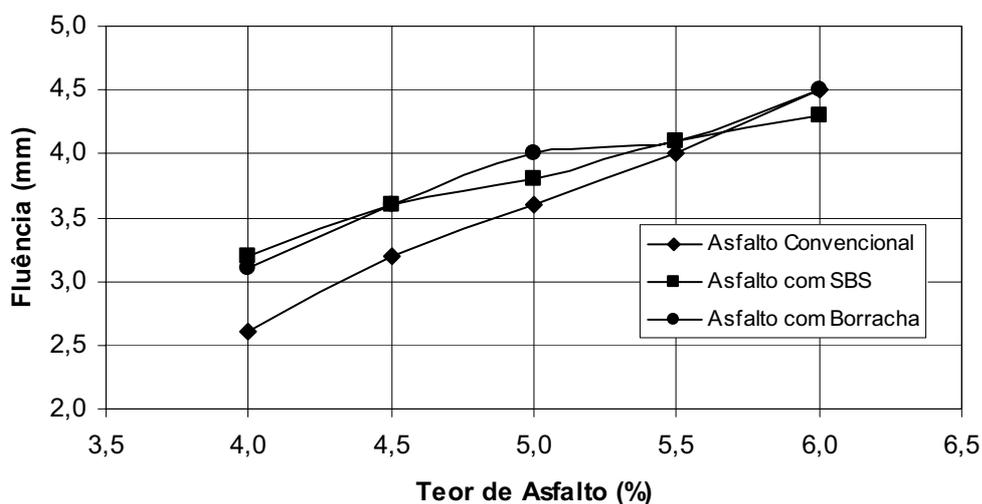


Figura 4.4 – Fluência versus teor de asfalto para distribuição granulométrica B do DNER.

Através da análise da figura 4.4 observa-se que as misturas asfálticas com asfalto convencional apresentaram os menores valores de fluência para teores de asfalto menores que 5,5%. Para as misturas com asfaltos modificados por polímero SBS e por borracha os valores de fluência para teores de asfalto menores que 5,5% são praticamente os mesmos. Para o teor de asfalto de 6,0%, o menor valor de fluência foi observado para mistura asfáltica com asfalto modificado por polímero SBS.

Os valores da estabilidade, em N, para a distribuição granulométrica B e para os três tipos de asfalto da pesquisa são apresentados na figura 4.5.

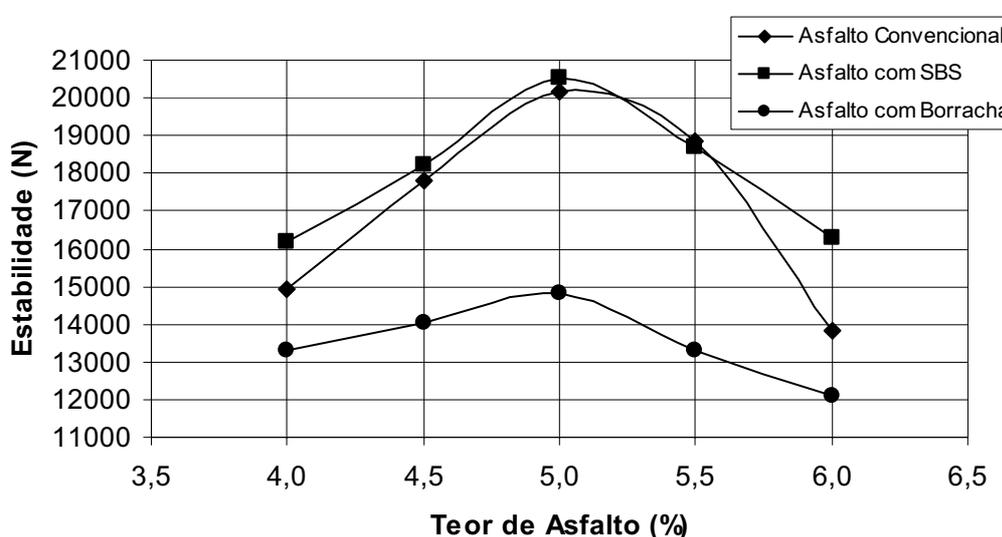


Figura 4.5 – Estabilidade versus teor de asfalto para a distribuição granulométrica B do DNER.

Observando-se a figura 4.5 nota-se que os maiores valores de estabilidade foram encontrados para misturas asfálticas confeccionadas com asfalto modificado por polímero SBS, enquanto que os menores foram observados para misturas asfálticas com asfalto modificado por borracha. Para misturas asfálticas com asfalto convencional, os valores de estabilidade foram pouco inferiores aos da mistura com asfalto modificado por polímero SBS.

A seguir, nas tabelas 4.4 a 4.6, apresentam-se os valores médios obtidos da dosagem Marshall para a distribuição granulométrica C (DNER-ES 313/97) e, nas

figuras 4.6 a 4.10, os gráficos de densidade aparente (DAP), volume de vazios (Vv), relação betume-vazios (RBV), fluência (F) e estabilidade (E) em função do teor de asfalto, para os três tipos de asfalto.

Tabela 4.4 – Valores médios dos parâmetros obtidos da dosagem Marshall para misturas asfálticas com asfalto convencional e distribuição granulométrica C do DNER.

Teor (%)	DAP (g/cm ³)	Vv (%)	Vb (%)	VAM (%)	RBV (%)	F (mm)	E (N)	E/F (N/mm)
4,5	2,490	6,26	10,94	17,20	63,6	3,1	16388	5286
5,0	2,497	5,22	12,19	17,41	70,0	3,2	17997	5624
5,5	2,509	3,98	13,47	17,46	77,2	3,6	20153	5598
6,0	2,499	3,56	14,64	18,20	80,4	3,9	15077	3866
6,5	2,492	3,04	15,82	18,86	83,9	4,2	13191	3140

Tabela 4.5 – Valores médios dos parâmetros obtidos da dosagem Marshall para misturas asfálticas com asfalto modificado por polímero SBS e distribuição granulométrica C do DNER.

Teor (%)	DAP (g/cm ³)	Vv (%)	Vb (%)	VAM (%)	RBV (%)	F (mm)	E (N)	E/F (N/mm)
4,5	2,488	6,33	10,93	17,26	63,4	3,6	14906	4141
5,0	2,498	5,17	12,20	17,36	70,2	3,7	17486	4726
5,5	2,510	3,92	13,48	17,40	77,5	4,0	21521	5380
6,0	2,505	3,34	14,68	18,01	81,5	4,2	19899	4738
6,5	2,499	2,79	15,86	18,65	85,0	5,1	16250	3186

Tabela 4.6 – Valores médios dos parâmetros obtidos da dosagem Marshall para misturas asfálticas com asfalto modificado por borracha moída de pneu e distribuição granulométrica C do DNER.

Teor (%)	DAP (g/cm ³)	Vv (%)	Vb (%)	VAM (%)	RBV (%)	F (mm)	E (N)	E/F (N/mm)
4,5	2,471	6,95	10,88	17,83	61,0	3,2	11316	3536
5,0	2,496	5,21	12,21	17,42	70,1	3,5	14271	4077
5,5	2,506	4,05	13,49	17,53	76,9	3,9	15228	3905
6,0	2,491	3,85	14,62	18,47	79,2	4,3	11760	2735
6,5	2,474	3,74	15,73	19,47	80,8	4,6	9037	1965

Na figura 4.6 apresentam-se os valores da densidade aparente, para a faixa C do DNER e para os três tipos de asfalto utilizados nas misturas asfálticas deste trabalho.

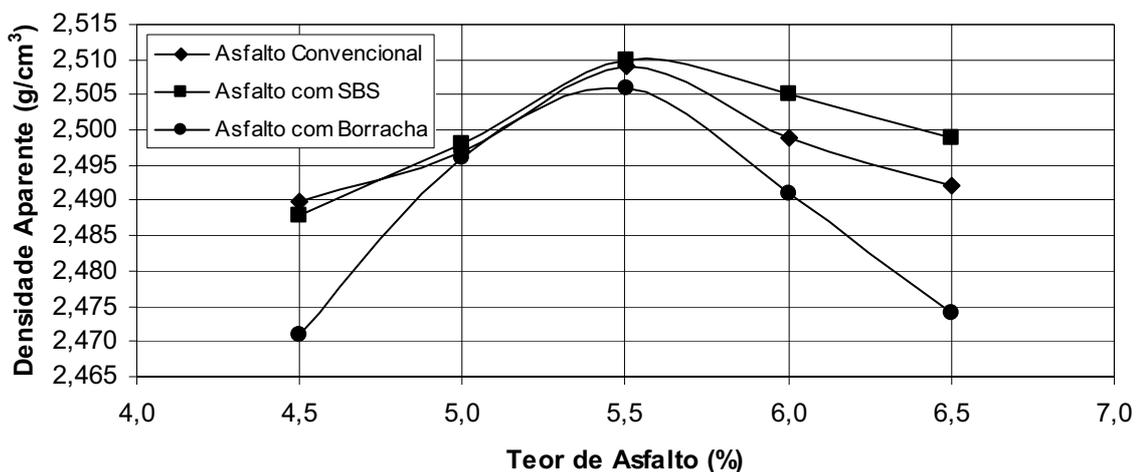


Figura 4.6 – Densidade aparente versus teor de asfalto para faixa C do DNER.

Verifica-se, através da análise da figura 4.6, que os valores de densidade aparente da mistura com asfalto modificado por borracha são menores quando comparados com os dos outros dois tipos de asfalto, fato não observado para a distribuição granulométrica B. Provavelmente, o fato de o asfalto com borracha possuir viscosidade elevada tenha prejudicado a compactação na distribuição granulométrica C, por esta ser mais fechada, apresentar menor permeabilidade e, conseqüentemente, produzir massa com densidade menor.

Os valores dos volumes de vazios para a faixa C do DNER e para os três tipos de asfaltos utilizados, versus o teor de asfalto, são mostrados na figura 4.7.

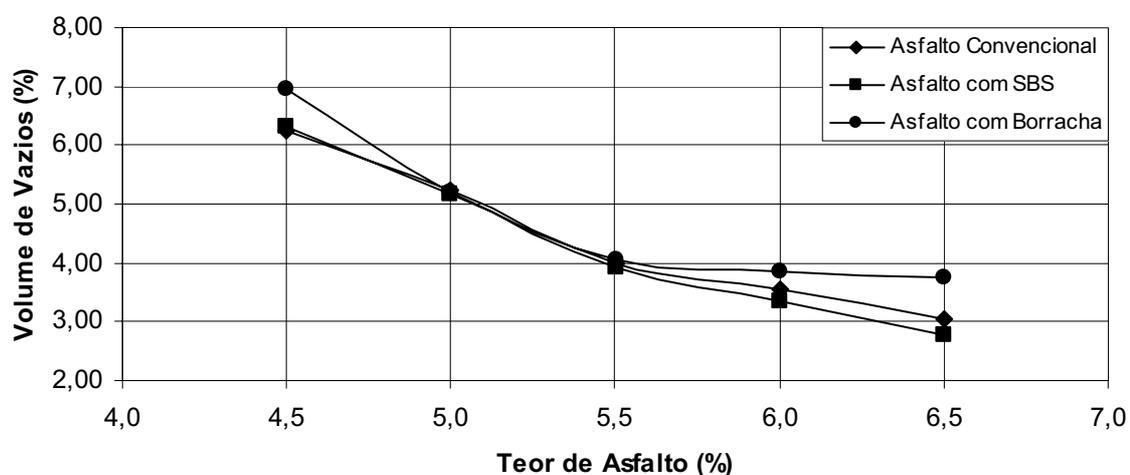


Figura 4.7 – Volume de vazios versus teor de asfalto para faixa C do DNER.

Nota-se na figura 4.7 os valores de volume de vazios para o asfalto modificado por borracha são os mais elevados, exceto para os teores de 5% e 5,5%, onde os valores são praticamente iguais para todos os asfalto.

Apresentam-se, na figura 4.8, os valores das relações betume-vazios expressas em porcentagem, para os três tipos de asfalto e para a distribuição granulométrica C do DNER.

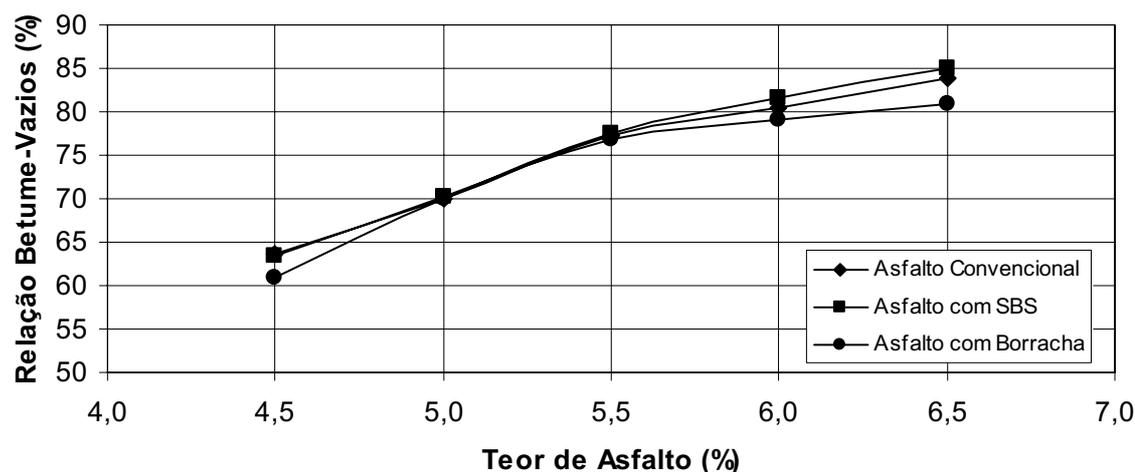


Figura 4.8 – Relação betume-vazios versus teor de asfalto para distribuição granulométrica C do DNER.

Na figura 4.8 observa-se que os maiores valores das relações betume-vazios são encontrados para o asfalto modificado por polímero nos teores de asfalto de 6% e 6,5%. O asfalto modificado por borracha sempre apresentou os menores valores, exceto para os teores de asfalto de 5% e 5,5%.

Na figura 4.9 apresentam-se os valores de fluência, em mm, para a distribuição granulométrica C do DNER e para os três tipos de asfalto.

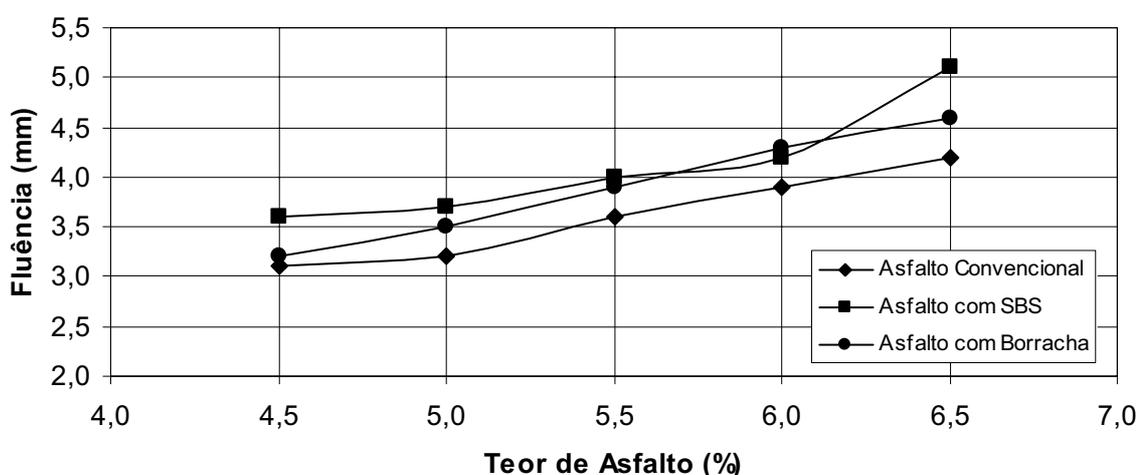


Figura 4.9 – Fluência versus teor de asfalto para distribuição granulométrica C do DNER.

Observando-se a figura 4.9 nota-se que os menores valores de fluência foram encontrados para o asfalto convencional, enquanto que os maiores valores foram os obtidos para o asfalto modificado por polímero SBS.

Observa-se na figura 4.10 os valores da estabilidade, em N, para a distribuição granulométrica C do DNER e para os três tipos de asfalto utilizados nesta pesquisa.

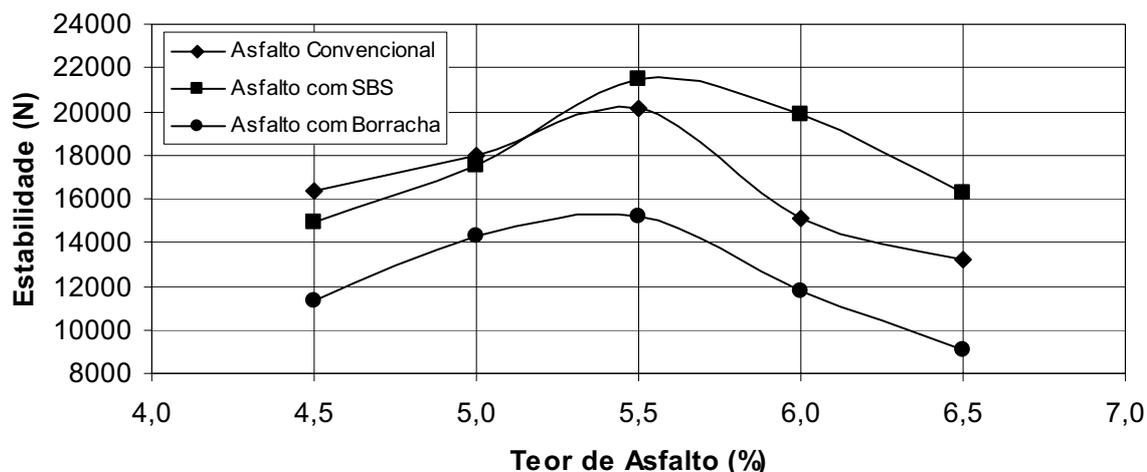


Figura 4.10 – Estabilidade versus teor de asfalto para distribuição granulométrica C do DNER.

Analisando-se a figura 4.10 observa-se que o mesmo observado para a distribuição granulométrica B ocorre na C; os valores de estabilidade são maiores para as misturas asfálticas confeccionadas com asfalto modificado por polímero SBS. Os menores valores de estabilidade são observados para misturas asfálticas com asfalto modificado por borracha.

De posse dos gráficos apresentados anteriormente, determinaram-se os teores ótimos de asfalto para volume de vazios igual a 4%, embora os critérios recomendados pela NBR 12891 para a determinação do teor ótimo sejam outros. Para a distribuição granulométrica B, os teores ótimos obtidos para as misturas asfálticas com os três tipos de asfaltos foram iguais, enquanto que para a distribuição granulométrica C, apenas a mistura com asfalto modificado por borracha não apresentou o mesmo valor. A tabela 4.7 apresenta os teores ótimos de asfalto para todas as misturas, obtidos para volume de vazios igual a 4%.

Tabela 4.7 – Teores ótimos de asfalto para $V_v = 4\%$.

Tipo de Asfalto	Distribuição Granulométrica	Teor ótimo de asfalto (%)
Convencional	C	5,5
Com 4,5% de SBS	C	5,5
Com 20% de borracha	C	5,6
Convencional	B	4,9
Com 4,5% de SBS	B	4,9
Com 20% de borracha	B	4,9

Como mencionado anteriormente, para este trabalho os teores ótimos obtidos da dosagem Marshall serviram como base para a determinação dos teores de trabalho, os quais foram assim fixados: 4,0%, 4,5%, 5,0% e 5,5% para a distribuição granulométrica B e 5,0%, 5,5%, 6,0% e 6,5% para a distribuição granulométrica C.

4.3. ENSAIOS DE FLUÊNCIA

4.3.1. Ensaio de fluência por compressão uniaxial estática

As Tabelas 4.8 a 4.14 apresentam os resultados obtidos do ensaio de fluência por compressão uniaxial estática de misturas asfálticas com asfalto convencional, com asfalto modificado por polímero SBS e com asfalto modificado por borracha, para as distribuições granulométricas B e C do DNER e para as tensões de 0,1 MPa, 0,4 MPa e 0,7 MPa.

Vale lembrar que o experimento foi fracionado e, portanto, não há ensaios em todos os teores de asfalto.

Tabela 4.8 – Valores médios da deformação total obtidos do ensaio de fluência por compressão uniaxial estática.

		Teor							
		4,0%	5,0%	4,5%	5,5%	5,0%	6,0%	5,5%	6,5%
		Faixa B	Faixa C						
Tensão de 0,1 MPa	Asfalto convencional			0,1485		0,1690			
	Asfalto com polímero		0,1820		0,1533		0,1548		0,2213
	Asfalto com borracha	0,1693						0,1755	
Tensão de 0,4 MPa	Asfalto convencional	0,2895	0,2630					0,2853	0,3863
	Asfalto com polímero	0,3143	0,2605	0,2423	0,2593	0,2870	0,4315	0,3438	0,3410
	Asfalto com borracha			0,2645	0,3110	0,3183	0,2283		
Tensão de 0,7 MPa	Asfalto convencional				0,4195		0,5255		
	Asfalto com polímero	0,3145		0,3158		0,3248		0,4295	
	Asfalto com borracha		0,3565						0,3613

Tabela 4.9 – Valores médios da deformação recuperável obtidos do ensaio de fluência por compressão uniaxial estática.

		Teor							
		4,0%	5,0%	4,5%	5,5%	5,0%	6,0%	5,5%	6,5%
		Faixa B	Faixa C						
Tensão de 0,1 MPa	Asfalto convencional			0,0775		0,0873			
	Asfalto com polímero		0,0768		0,0755		0,0828		0,0805
	Asfalto com borracha	0,0795						0,0673	
Tensão de 0,4 MPa	Asfalto convencional	0,2058	0,1745					0,1710	0,1808
	Asfalto com polímero	0,1488	0,1440	0,1420	0,1428	0,1660	0,1825	0,1613	0,1350
	Asfalto com borracha			0,1323	0,1535	0,1578	0,1353		
Tensão de 0,7 MPa	Asfalto convencional				0,2498		0,2808		
	Asfalto com polímero	0,1948		0,1845		0,2273		0,2343	
	Asfalto com borracha		0,1920						0,1885

Tabela 4.10 – Valores médios da deformação não recuperável obtidos do ensaio de fluência por compressão uniaxial estática.

		Teor							
		4,0%	5,0%	4,5%	5,5%	5,0%	6,0%	5,5%	6,5%
		Faixa B	Faixa C						
Tensão de 0,1 MPa	Asfalto convencional			0,0710		0,0818			
	Asfalto com polímero		0,1053		0,0773		0,0725		0,1410
	Asfalto com borracha	0,0898						0,1083	
Tensão de 0,4 MPa	Asfalto convencional	0,0838	0,0885					0,1143	0,2060
	Asfalto com polímero	0,1655	0,1163	0,0998	0,1163	0,1213	0,2490	0,1825	0,2060
	Asfalto com borracha			0,1323	0,1573	0,1605	0,0930		
Tensão de 0,7 MPa	Asfalto convencional				0,1700		0,2448		
	Asfalto com polímero	0,1198		0,1313		0,0973		0,1953	
	Asfalto com borracha		0,1645						0,1735

Tabela 4.11 – Valores médios de recuperação obtidos do ensaio de fluência por compressão uniaxial estática.

		Teor							
		4,0%	5,0%	4,5%	5,5%	5,0%	6,0%	5,5%	6,5%
		Faixa B	Faixa C						
Tensão de 0,1 MPa	Asfalto convencional			50,74		53,22			
	Asfalto com polímero		45,16		46,54		54,83		36,67
	Asfalto com borracha	47,95						38,45	
Tensão de 0,4 MPa	Asfalto convencional	71,10	66,92					60,84	47,09
	Asfalto com polímero	47,43	56,10	58,58	54,13	58,20	43,08	49,31	40,88
	Asfalto com borracha			50,43	49,81	53,68	59,69		
Tensão de 0,7 MPa	Asfalto convencional				60,31		52,59		
	Asfalto com polímero	61,80		58,02		68,87		54,91	
	Asfalto com borracha		53,03						52,13

Tabela 4.12 – Valores médios do módulo de fluência para 3600 s obtidos do ensaio de fluência por compressão uniaxial estática.

		Teor							
		4,0%	5,0%	4,5%	5,5%	5,0%	6,0%	5,5%	6,5%
		Faixa B	Faixa C						
Tensão de 0,1 MPa	Asfalto convencional			68,42		62,02			
	Asfalto com polímero		56,86		68,59		65,20		50,90
	Asfalto com borracha	62,54						57,09	
Tensão de 0,4 MPa	Asfalto convencional	142,86	159,67					143,62	107,47
	Asfalto com polímero	141,25	156,44	168,52	157,09	142,02	98,57	139,30	120,32
	Asfalto com borracha			157,63	133,93	154,47	177,21		
Tensão de 0,7 MPa	Asfalto convencional				172,01		136,94		
	Asfalto com polímero	226,83		235,93		221,81		188,49	
	Asfalto com borracha		207,27						194,43

Tabela 4.13 – Valores médios do módulo de fluência para 4500 s obtidos do ensaio de fluência por compressão uniaxial estática.

		Teor							
		4,0%	5,0%	4,5%	5,5%	5,0%	6,0%	5,5%	6,5%
		Faixa B	Faixa C						
Tensão de 0,1 MPa	Asfalto convencional			141,37		141,25			
	Asfalto com polímero		129,38		165,20		173,53		80,47
	Asfalto com borracha	130,90						97,21	
Tensão de 0,4 MPa	Asfalto convencional	597,63	511,87					395,35	205,94
	Asfalto com polímero	273,33	371,78	406,52	350,07	353,62	176,42	294,05	210,88
	Asfalto com borracha			321,12	270,44	374,46	457,46		
Tensão de 0,7 MPa	Asfalto convencional				550,67		291,42		
	Asfalto com polímero	608,44		577,25		730,46		425,35	
	Asfalto com borracha		436,74						407,39

Tabela 4.14 – Valores médios da inclinação do trecho entre 1000 s e 3600 s obtidos do ensaio de fluência por compressão uniaxial estática.

		Teor							
		4,0%	5,0%	4,5%	5,5%	5,0%	6,0%	5,5%	6,5%
		Faixa B	Faixa C	Faixa B	Faixa C	Faixa B	Faixa C	Faixa B	Faixa C
Tensão de 0,1 MPa	Asfalto convencional			0,0439		0,0632			
	Asfalto com polímero		0,0588		0,0858		0,0536		0,1466
	Asfalto com borracha	0,1136						0,0942	
Tensão de 0,4 MPa	Asfalto convencional	0,0126	0,0455					0,0260	0,0462
	Asfalto com polímero	0,1059	0,0585	0,1158	0,1150	0,0519	0,1020	0,0858	0,1195
	Asfalto com borracha			0,0858	1,0462 E-5	0,0525	9,6154 E-6		
Tensão de 0,7 MPa	Asfalto convencional				0,0189		0,0231		
	Asfalto com polímero	0,0552		0,0746		0,0415		0,0739	
	Asfalto com borracha		0,0809						0,0516

4.3.2. Ensaio de fluência por compressão uniaxial dinâmica

As tabelas 4.15 a 4.17 apresentam os valores médios da deformação final, inclinação entre 100 s e 5000 s e módulo de fluência a 5000 s, para as misturas asfálticas com asfalto convencional, com asfalto modificado por polímero SBS e com asfalto modificado por borracha, para as distribuições granulométricas B e C do DNER e para as três tensões utilizadas: 01 MPa, 0,4 MPa e 0,7 MPa.

Tabela 4.15 – Valores médios da deformação final obtidos do ensaio de fluência por compressão uniaxial dinâmica.

		Teor							
		4,0%	5,0%	4,5%	5,5%	5,0%	6,0%	5,5%	6,5%
		Faixa B	Faixa C						
Tensão de 0,1 MPa	Asfalto convencional			0,3370		0,3630			
	Asfalto com polímero		0,2130		0,3580		0,4720		0,4100
	Asfalto com borracha	0,3720						0,3000	
Tensão de 0,4 MPa	Asfalto convencional	0,4630	0,5610					0,3810	0,7290
	Asfalto com polímero	0,2480	0,2870	0,3070	0,3400	0,3700	0,3990	0,3450	0,7030
	Asfalto com borracha			0,2030	0,3000	0,2940	0,3460		
Tensão de 0,7 MPa	Asfalto convencional		0,4960		0,5290		0,8290		
	Asfalto com polímero	0,3270		0,2680	0,3480	0,3500		0,4270	
	Asfalto com borracha		0,3210						0,3750

Tabela 4.16 – Valores médios da inclinação do trecho entre 100 s e 5000 s obtidos do ensaio de fluência por compressão uniaxial dinâmica.

		Teor							
		4,0%	5,0%	4,5%	5,5%	5,0%	6,0%	5,5%	6,5%
		Faixa B	Faixa C						
Tensão de 0,1 MPa	Asfalto convencional			0,2370		0,1880			
	Asfalto com polímero		0,0810		0,1940		0,1810		0,1390
	Asfalto com borracha	0,0640						0,0770	
Tensão de 0,4 MPa	Asfalto convencional	0,1550	0,1300					0,2680	0,1420
	Asfalto com polímero	0,2030	0,1050	0,1090	0,2170	0,0970	0,2180	0,2180	0,2350
	Asfalto com borracha			0,0840	0,1150	0,1340	0,1250		
Tensão de 0,7 MPa	Asfalto convencional		0,1575		0,2350		0,2420		
	Asfalto com polímero	0,1750		0,1550	0,1810	0,2210		0,2510	
	Asfalto com borracha		0,1370						0,1180

Tabela 4.17 – Valores médios do módulo de fluência para 5000 s obtidos do ensaio de fluência por compressão uniaxial dinâmica.

		Teor							
		4,0%	5,0%	4,5%	5,5%	5,0%	6,0%	5,5%	6,5%
		Faixa B	Faixa C						
Tensão de 0,1 MPa	Asfalto convencional			30,00		31,00			
	Asfalto com polímero		46,00		29,00		22,00		29,00
	Asfalto com borracha	31,00						37,00	
Tensão de 0,4 MPa	Asfalto convencional	78,00	63,00					92,00	48,00
	Asfalto com polímero	149,00	128,00	119,00	119,00	146,00	97,00	102,00	52,00
	Asfalto com borracha			187,00	145,00	139,00	125,00		
Tensão de 0,7 MPa	Asfalto convencional		149,00		124,00		83,00		
	Asfalto com polímero	205,00		252,00	182,00	185,00		149,00	
	Asfalto com borracha		204,00						187,00

4.4. ANÁLISE DE VARIÂNCIA (ANOVA)

4.4.1. Introdução

A análise de variância consiste em uma técnica estatística para comparação simultânea de várias médias, onde é verificada a existência de diferença entre as médias das populações, permitindo a verificação da hipótese nula em que o efeito sob consideração é significativo em termos do teste estatístico F .

Usa-se um teste de hipótese com o propósito de comparar uma estimativa do efeito de um tratamento ou amostra com a estimativa do erro aleatório. Considerando-se que o erro aleatório é desprezível, sendo possível, através dessa comparação, verificar se o efeito do tratamento em questão é ou não significativo.

Com os valores experimentais obtidos das amostras, e utilizando-se como um critério de aceitação ou rejeição da hipótese em consideração um teste de hipótese estatístico, como, por exemplo, o teste F das variâncias amostrais, é possível avaliar se os fatores em estudo são ou não significantes.

A validade de testes estatísticos de significância depende da existência de réplicas, pois estas fornecem uma estimativa do erro aleatório e tornam possível o uso de tabelas de significância. Existe ainda o problema da dispersão dos resultados em um mesmo corpo-de-prova e entre corpos-de-prova, que prejudicam a análise estatística dos resultados. Segundo Vianna et al. (2003), essa dispersão existe devido a um erro associado à forma de medida dos deslocamentos, com a colocação dos LVDTs no topo do corpo-de-prova, onde as irregularidades de contato entre o corpo-de-prova, a base de apoio e a placa de carregamento interferem nos valores dos deslocamentos.

4.4.2. Resultados da análise de variância

Utilizando-se o método de Grubbs, os valores obtidos dos ensaios de fluência por compressão uniaxial estática (deformação final, deformação recuperável, deformação total, recuperação, inclinação do trecho entre 1000 s e 3600 s, módulo de fluência para 3600 s e módulo de fluência para 4500 s) e de fluência por compressão

uniaxial dinâmica (deformação final, inclinação do trecho entre 100 s e 5000 s e módulo de fluência para 5000 s) foram filtrados antes de proceder-se a análise de variância.

O teste de Grubbs consiste em uma ferramenta estatística utilizada para identificação de *outliers* nos resultados dos ensaios (Grubbs, 1969). Como essa análise estatística identifica apenas um *outlier* em cada iteração, retira-se o valor considerado incorreto e procede-se novas iterações até que não seja encontrado mais nenhum *outlier*.

Conhecendo-se os valores máximo e mínimo do conjunto de resultados a ser analisado é possível calcular a estatística “G”, definida pela expressão 4.1.

$$G = \frac{\text{máx}|y_i - \bar{y}|}{s} \quad (4.1)$$

onde:

y_i = valores máximo e mínimo do conjunto de resultados;

\bar{y} = média dos resultados;

s = desvio padrão dos resultados

Calculada a estatística “G”, esta deve ser comparada com o valor de “ $G_{\text{crítico}}$ ” (tabelado), que para o caso de três observações é 1,15 para os níveis de confiança de 95%, 97,5% e 99%. O valor será considerado um *outlier* se $G > G_{\text{crítico}}$. Verificou-se que a filtragem pelo método de Grubbs não produziu resultados satisfatórios, isto é, o teste de Grubbs não foi capaz de identificar os *outliers*. Decidiu-se então efetuar dois tipos de filtragem, uma utilizando-se $\pm 1,10$ do desvio padrão, ou seja, os valores fora deste intervalo foram considerados *outliers* e a outra excluindo-se arbitrariamente uma das três réplicas de cada condição de ensaio.

Os resultados da análise de variância para os resultados obtidos do ensaio de fluência por compressão uniaxial estática, para o nível de confiança de 95%, e para a filtragem realizada, excluindo-se umas das réplicas, são apresentados nas tabelas 4.18 a 4.24.

Na tabela 4.18 apresenta-se um resumo da análise de variância dos valores da deformação final obtidos do ensaio de fluência por compressão uniaxial estática, para o nível de confiança de 95%.

Tabela 4.18 – Análise de variância dos valores da deformação final obtidos do ensaio de fluência por compressão uniaxial estática para o nível de confiança de 95%.

	$F_{\text{calculado}}$	$F_{0,05}$	Significativo ?
distrib. granulométrica (X1)	4,325	4,076	Sim
teor de asfalto (A)	1,496	3,226	Não
tensão (B)	9,330	3,226	Sim
tipo de asfalto (C)	0,098	4,076	Não

Analisando-se a tabela 4.18, nota-se que a distribuição granulométrica e a tensão do ensaio têm influência na deformação final. Entretanto, o principal fator que afeta a deformação final é a tensão do ensaio.

Na tabela 4.19 apresenta-se a análise de variância para os valores da deformação recuperável obtidos do ensaio de fluência por compressão uniaxial estática, para o nível de confiança de 95%.

Tabela 4.19 – Análise de variância dos valores da deformação recuperável obtidos do ensaio de fluência por compressão uniaxial estática para o nível de confiança de 95%.

	$F_{\text{calculado}}$	$F_{0,05}$	Significativo ?
distrib. granulométrica (X1)	1,5603	4,076	Não
teor de asfalto (A)	4,1744	3,226	Sim
tensão (B)	152,236	3,226	Sim
tipo de asfalto (C)	24,878	4,076	Sim

Da análise da tabela 4.19 tem-se que o fator que mais influencia a deformação recuperável é a tensão do ensaio, e que a distribuição granulométrica não influencia a deformação recuperável. Após a tensão, os fatores de maior importância para a deformação recuperável são o tipo e o teor de asfalto, respectivamente.

A análise de variância dos valores da deformação total do ensaio de fluência por compressão uniaxial estática, isto é, a deformação obtida para 3600 s, para o nível de confiança de 95%, é apresentada na tabela 4.20.

Tabela 4.20 – Análise de variância dos valores da deformação total obtidos do ensaio de fluência por compressão uniaxial estática para o nível de confiança de 95%.

	$F_{\text{calculado}}$	$F_{0,05}$	Significativo ?
distrib. granulométrica (X1)	4,568	4,076	sim
teor de asfalto (A)	2,900	3,226	não
tensão (B)	51,192	3,226	sim
tipo de asfalto (C)	2,749	4,076	não

Observa-se na tabela 4.20 que os fatores tensão e distribuição granulométrica têm importância para a deformação total. Esperava-se que o fator teor de asfalto também tivesse importância, pois através da revisão da literatura tem-se que o ensaio de fluência por compressão uniaxial estática apenas não distingue misturas asfálticas com diferentes tipos de asfalto.

Na tabela 4.21 apresenta-se a análise de variância dos valores de recuperação obtidos do ensaio de fluência por compressão uniaxial estática para o nível de confiança de 95%.

Tabela 4.21 – Análise de variância dos valores de recuperação obtidos do ensaio de fluência por compressão uniaxial estática para o nível de confiança de 95%.

	$F_{\text{calculado}}$	$F_{0,05}$	Significativo ?
distrib. granulométrica (X1)	11,126	4,076	sim
teor de asfalto (A)	11,187	3,226	sim
tensão (B)	15,137	3,226	sim
tipo de asfalto (C)	9,209	4,076	sim

Através da análise da tabela 4.21 observa-se que os quatro fatores em estudo, distribuição granulométrica, teor de asfalto, tensão e tipo de asfalto, têm influência na recuperação. Esperava-se que o tipo de asfalto não tivesse importância, pois como visto na literatura, o ensaio de fluência por compressão uniaxial estática não é capaz de distinguir misturas com diferentes tipos de asfalto. O fator de maior importância

foi a tensão, seguida do teor de asfalto, da distribuição granulométrica e do tipo de asfalto, respectivamente.

A análise de variância dos valores da inclinação do trecho entre 1000 s e 3600 s do ensaio de fluência por compressão uniaxial estática, para o nível de confiança de 95%, é apresentada na tabela 4.22.

Tabela 4.22 – Análise de variância dos valores da inclinação do trecho entre 1000 s e 3600 s obtidos do ensaio de fluência por compressão uniaxial estática para o nível de confiança de 95%.

	$F_{\text{calculado}}$	$F_{0,05}$	Significativo ?
distrib. granulométrica (X1)	0,021	4,076	não
teor de asfalto (A)	1,655	3,226	não
tensão (B)	2,315	3,226	não
tipo de asfalto (C)	15,418	4,076	sim

Observa-se na tabela 4.22 que apenas o tipo de asfalto é significativo na inclinação do trecho entre 1000 s e 3600 s para o nível de confiança de 95%.

Na tabela 4.23 apresenta-se a análise de variância dos valores do módulo de fluência para 3600 s obtidos do ensaio de fluência por compressão uniaxial estática, para o nível de confiança de 95%.

Tabela 4.23 – Análise de variância dos valores do módulo de fluência para 3600 s obtidos do ensaio de fluência por compressão uniaxial estática para o nível de confiança de 95%.

	$F_{\text{calculado}}$	$F_{0,05}$	Significativo ?
distrib. granulométrica (X1)	6,832	4,076	sim
teor de asfalto (A)	1,805	3,226	não
tensão (B)	122,883	3,226	sim
tipo de asfalto (C)	5,227	4,076	sim

Nota-se na tabela 4.23 que apenas o teor de asfalto não é significativo no módulo de fluência para 3600 s. O fator de maior importância é a tensão e o de menor importância é o tipo de asfalto.

Na tabela 4.24 apresenta-se a análise de variância dos valores do módulo de fluência para 4500 s obtidos do ensaio de fluência por compressão uniaxial estática com nível de confiança de 95%.

Tabela 4.24 – Análise de variância dos valores do módulo de fluência para 4500 s obtidos do ensaio de fluência por compressão uniaxial estática para o nível de confiança de 95%.

	$F_{\text{calculado}}$	$F_{0,05}$	Significativo ?
distrib. granulométrica (X1)	3,548	4,076	não
teor de asfalto (A)	0,640	3,226	não
tensão (B)	32,611	3,226	sim
tipo de asfalto (C)	1,196	4,076	não

Nota-se na tabela 4.24 que o fator que influe no módulo de fluência para 4500 s é a tensão do ensaio.

Nas tabelas 4.25 a 4.27 apresenta-se a análise de variância dos resultados obtidos do ensaio de fluência por compressão uniaxial dinâmica, para o nível de confiança de 95% e para a filtragem realizada excluindo-se umas das réplicas.

A análise de variância, para o nível de confiança de 95%, dos valores da deformação final do ensaio de fluência por compressão uniaxial dinâmica é apresentada na tabela 4.25.

Tabela 4.25 – Análise de variância dos valores da deformação final obtidos do ensaio de fluência por compressão uniaxial dinâmica para o nível de confiança de 95%.

	$F_{\text{calculado}}$	$F_{0,05}$	Significativo ?
distrib. granulométrica (X1)	9,338	4,076	sim
teor de asfalto (A)	4,350	3,226	sim
tensão (B)	2,393	3,226	não
tipo de asfalto (C)	23,378	4,076	sim

Através da análise da tabela 4.25 nota-se que apenas a tensão do ensaio não é significativo para a deformação final do ensaio de fluência por compressão uniaxial

dinâmica, fato que condiz com o observado na literatura, pois tem-se que o ensaio de fluência por compressão uniaxial dinâmica é capaz de distinguir misturas asfálticas compostas de diferentes tipos de asfalto.

A tabela 4.26 apresenta a análise de variância dos valores da inclinação do trecho entre 100 s e 5000 s para um nível de confiança de 95%.

Tabela 4.26 – Análise de variância dos valores da inclinação do trecho entre 100 s e 5000 s obtidos do ensaio de fluência por compressão uniaxial dinâmica para o nível de confiança de 95%.

	$F_{\text{calculado}}$	$F_{0,05}$	Significativo ?
distrib. granulométrica (X1)	0,943	4,076	não
teor de asfalto (A)	4,091	3,226	sim
tensão (B)	2,934	3,226	não
tipo de asfalto (C)	16,575	4,076	sim

Observando-se a tabela 4.26 tem-se que, para um nível de confiança de 95%, a inclinação do trecho entre 100 s e 5000 s independe da distribuição granulométrica e da tensão do ensaio, sendo o fator de principal importância o tipo de asfalto seguido do teor de asfalto.

Apresenta-se na tabela 4.27 a análise de variância dos valores do módulo de fluência para 5000 s do ensaio de fluência por compressão uniaxial dinâmica para um nível de confiança de 95%.

Tabela 4.27 – Análise de variância dos valores do módulo de fluência para 5000 s obtidos do ensaio de fluência por compressão uniaxial dinâmica para o nível de confiança de 95%.

	$F_{\text{calculado}}$	$F_{0,05}$	Significante ?
distrib. granulométrica (X1)	13,954	4,076	sim
teor de asfalto (A)	2,353	3,226	não
tensão (B)	78,068	3,226	sim
tipo de asfalto (C)	31,575	4,076	sim

Tem-se na tabela 4.27, com um nível de confiança de 95%, que os fatores significativos para o módulo de fluência para 5000 s são a tensão do ensaio, o tipo de asfalto e a distribuição granulométrica, respectivamente.

4.5. MODELOS ESTATÍSTICOS

Após a análise dos resultados através da análise de variância, que segundo Dunn e Clark (1987) é um teste de hipóteses para a verificação da existência de diferença entre as médias de duas populações independentes, foram construídos modelos polinomiais multiplicativos.

Os modelos estatísticos foram feitos para os valores obtidos dos ensaios de fluência por compressão uniaxial estática e dinâmica, filtrados através do método de Grubbs, filtrados para $\pm 1,10$ do desvio padrão e filtrados eliminando-se arbitrariamente uma das réplicas.

Em seguida apresentam-se os modelos estatísticos estabelecidos para os valores filtrados através da eliminação de uma das réplicas, por terem sido encontrado melhores correlações com esses valores.

Na tabela 4.28 tem-se a nomenclatura dos fatores avaliados nesta pesquisa e seus números de níveis correspondentes.

Tabela 4.28 – Nomenclatura dos fatores avaliados nesta pesquisa e seus números de níveis correspondentes.

Fatores		Níveis
distrib. granulométrica	X1	2
teor de asfalto	A = X2 + X3	4
Tensão	B = X4 + X5	3
tipo de asfalto	C = X6 + X7	3

O modelo de regressão múltipla completo para esta pesquisa, considerando-se modelagem por polinômio de grau 2, tem a seguinte forma:

$$Y = \alpha_0 + \alpha_{X1}P(X1) + \alpha_{A1}P_1(A) + \alpha_{Aq}P_q(A) + \alpha_{B1}P_1(B) + \alpha_{Bq}P_q(B) + \alpha_C P(C) + \alpha_{X1A1}P(X1)P_1(A) + \alpha_{X1Aq}P(X1)P_q(A) + \alpha_{X1B1}P(X1)P_1(B) + \alpha_{X1Bq}P(X1)P_q(B) + \alpha_{X1C}P(X1)P(C) + \alpha_{A1B1}P_1(A)P_1(B) + \alpha_{A1Bq}P_1(A)P_q(B) + \alpha_{AqB1}P_q(A)P_1(B) + \alpha_{AqBq}P_q(A)P_q(B) + \alpha_{A1C}P_1(A)P(C) + \alpha_{AqC}P_q(A)P(C) + \alpha_{B1C}P_1(B)P(C) + \alpha_{BqC}P_q(B)P(C)$$

Onde:

Y = variável dependente ou variável de resposta;

$X1, A, B, C$ = fatores ou variáveis independentes;

$\alpha_0 = \bar{Y}$ = média total de todas as observações;

α_{X1} = coeficiente correspondente ao fator $X1$, termo linear;

α_{A1} = coeficiente correspondente ao fator A , termo linear;

α_{Aq} = coeficiente correspondente ao fator A , termo quadrático;

α_{B1} = coeficiente correspondente ao fator B , termo linear;

α_{Bq} = coeficiente correspondente ao fator B , termo quadrático;

α_C = coeficiente correspondente ao fator C , termo linear;

α_{X1A1} = coeficiente correspondente à interação $X1A1$;

⋮

O coeficiente da análise de regressão $\alpha = SQ/L$ é obtido através da análise de variância; SQ é a soma dos quadrados e $L = \sum \bar{\bar{Y}}_c^+ - \sum \bar{\bar{Y}}_c^-$, onde $\bar{\bar{Y}}_c$ é a média por tratamento ou condição experimental.

Embora o fator A tenha 4 níveis e pudesse contribuir com até três termos para o modelo de regressão (linear, quadrático e cúbico), foram considerados apenas os termos linear e quadrático, ou seja, a modelagem dos dados será aproximada por um polinômio de ordem 2.

O fator quantitativo em três níveis, fator B , contribuirá com dois termos, linear e quadrático.

O fator C em três níveis, por ser qualitativo, contribuirá apenas com um termo, que deve ser linear.

Os termos linear e quadrático encontrados para o teor de asfalto (fator A) na faixa granulométrica B são apresentados nas equações 4.1 e 4.2.

$$P_l(A) = 2 \times \left(\frac{A - 4,75}{0,5} \right) \quad (4.1)$$

$$P_q(A) = \left(\frac{A - 4,75}{0,5} \right)^2 - \left(\frac{4^2 - 1}{12} \right) \quad (4.2)$$

Para a faixa granulométrica C, os termos linear e quadrático do teor de asfalto (fator A) são dados nas equações 4.3 e 4.4.

$$P_l(A) = 2 \times \left(\frac{A - 5,75}{0,5} \right) \quad (4.3)$$

$$P_q(A) = \left(\frac{A - 5,75}{0,5} \right)^2 - \left(\frac{4^2 - 1}{12} \right) \quad (4.4)$$

Para o fator B (tensão), os termos linear e quadrático são apresentados nas equações 4.5 e 4.6.

$$P_l(B) = \left(\frac{B - 0,4}{0,3} \right) \quad (4.5)$$

$$P_q(B) = \left(\frac{B - 0,4}{0,3} \right)^2 - \left(\frac{3^2 - 1}{12} \right) \quad (4.6)$$

Nas equações 4.7 a 4.13 apresentam-se os modelos estatísticos obtidos dos resultados dos ensaios de fluência por compressão uniaxial estática.

A equação 4.7 apresenta o modelo estatístico obtido para os valores da deformação final. Segundo a análise de variância para o nível de confiança de 95%, foram considerados significativos a distribuição granulométrica e tensão.

$$Y = 0,00123 + 0,000125X_1 + 0,000358P_l(B) \quad (4.7)$$

$$R^2 = \text{SQi/SQtotal} = 0,43$$

Para a deformação recuperável os fatores significativos são o teor de asfalto e tensão utilizada no ensaio. O modelo estatístico estabelecido para essa condição é apresentado na equação 4.8.

$$Y = 0,00152 + 0,000065P_l(A) - 0,000069P_q(A) + 0,000708P_l(B) + 0,000067P_q(B) - 0,00210C \quad (4.8)$$

$$R^2 = \text{SQi/SQtotal} = 0,90$$

A equação 4.9 apresenta o modelo estatístico para a deformação total, onde o fatores significativos para os nível de confiança de 95% são a distribuição granulométrica a tensão utilizada no ensaio de fluência por compressão uniaxial estática.

$$Y = 0,00275 + 0,000161X_1 + 0,00107P_l(B) \quad (4.9)$$

$$R^2 = \text{SQi/SQtotal} = 0,76$$

O modelo estatístico obtido para os valores de recuperação, para o nível de confiança de 95%, é apresentado na equação 4.10. Todos os fatores em estudo são significativos.

$$Y = 52,4 - 2,4X_1 - 3,021P_l(A) + 2,5P_q(A) + 5,5P_l(B) + 3,17C \quad (4.10)$$

$$R^2 = \text{SQi/SQtotal} = 0,66$$

Segundo a análise de variância dos valores obtidos para a inclinação do trecho entre 1000 s e 3600 s, com um nível de confiança de 95%, o fator significativo foi o tipo de asfalto. O modelo estatístico estabelecido para esta condição é apresentado na equação 4.11.

$$Y = 0,066 + 0,022C \quad (4.11)$$

$$R^2 = \text{SQi/SQtotal} = 0,42$$

A equação 4.12 apresenta o modelo estatístico para o módulo de fluência para 3600 s, com um nível de confiança de 95%, onde os fatores significativos são a distribuição granulométrica, a tensão e o tipo de asfalto.

$$Y = 138,3 - 8,1X_1 + 68,1P_1(B) + 6,8P_q(B) + 10,3C \quad (4.12)$$

$$R^2 = SQ_i/SQ_{total} = 0,88$$

O modelo estatístico para o módulo de fluência para 4500 s, com um nível de confiança de 95%, é apresentado na equação 4.13. O fator significativo foi a tensão.

$$Y = 349,0 + 192,8P_1(B) \quad (4.13)$$

$$R^2 = SQ_i/SQ_{total} = 0,65$$

As equações 4.14 a 4.16 apresentam os modelos polinomiais multiplicativos obtidos dos resultados dos ensaios de fluência por compressão uniaxial dinâmica.

Os fatores significativos na deformação final do ensaio de fluência por compressão uniaxial dinâmica, para o nível de confiança de 95%, foram a distribuição granulométrica, o teor de asfalto e o tipo de asfalto. A equação 4.14 apresenta o modelo estatístico desenvolvido para esta condição.

$$Y = 0,0037 + 0,00044X_1 + 0,0004P_1(A) + 0,00043P_1(B) - 0,001C \quad (4.14)$$

$$R^2 = SQ_i/SQ_{total} = 0,55$$

A equação 4.15 apresenta o modelo estatístico obtido dos valores da inclinação do trecho entre 100 s e 5000 s. Os fatores significativos foram o teor e o tipo de asfalto para o nível de confiança de 95%.

$$Y = 0,162 + 0,022P_1(A) - 0,04C \quad (4.15)$$

$$R^2 = SQ_i/SQ_{total} = 0,47$$

A equação 4.16 apresenta o modelo estatístico, para um nível de confiança de 95%, dos valores do módulo de fluência para 5000 s. Os fatores significativos foram a distribuição granulométrica a tensão e o tipo de asfalto.

$$Y = 122 - 15,3X1 + 72P_i(B) + 33,5C \quad (4.16)$$

$$R^2 = SQ_i/SQ_{total} = 0,84$$

4.5.1. Exemplos da Aplicação de Modelos Polinomiais Multiplicativos

Com fins ilustrativos, são apresentadas em gráficos as curvas de regressão e os dados experimentais referentes à deformação total e à recuperável, lançados em função do teor de asfalto. Como a deformação total não variou significativamente com o teor de asfalto, apresenta-se também um gráfico de sua variação com a tensão de ensaio. Para melhor visualização, cada modelo de comportamento foi apresentado no mesmo gráfico onde foram lançados os pontos experimentais utilizados para sua construção.

Nas figuras 4.11 e 4.12 encontram-se os pontos experimentais e as curvas de regressão referentes à resposta deformação total do ensaio de fluência estática, sendo que na Figura 4.11 encontram-se os dados correspondentes à graduação B e na Figura 4.12, os dados correspondentes à graduação C, ambos lançados em função do teor de asfalto.

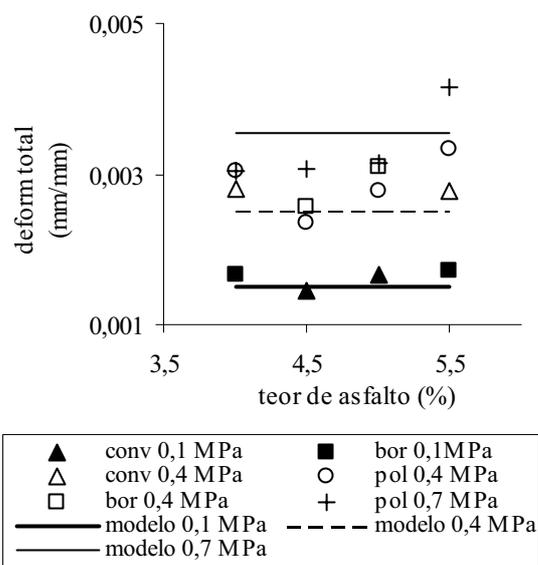


Figura 4.11 – Deformação total medida no ensaio de fluência por compressão uniaxial estática, em função do teor de asfalto utilizado na mistura, para a graduação B.

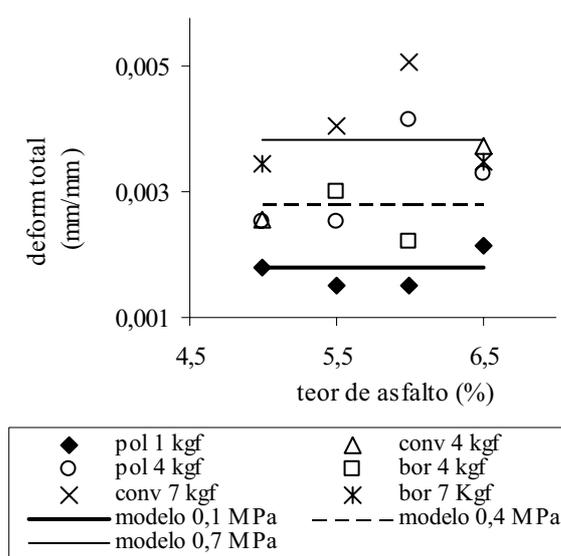


Figura 4.12 – Deformação total medida no ensaio de fluência por compressão uniaxial estática, em função do teor de asfalto utilizado na mistura, para a graduação C.

Na figura 4.13 encontra-se apresentada a variação da deformação total com a tensão de ensaio, de acordo com o modelo de comportamento obtido para essa resposta. Os pontos experimentais foram apresentados na Figura 4.13 conforme convenção utilizada nas Figuras 4.11 e 4.12.

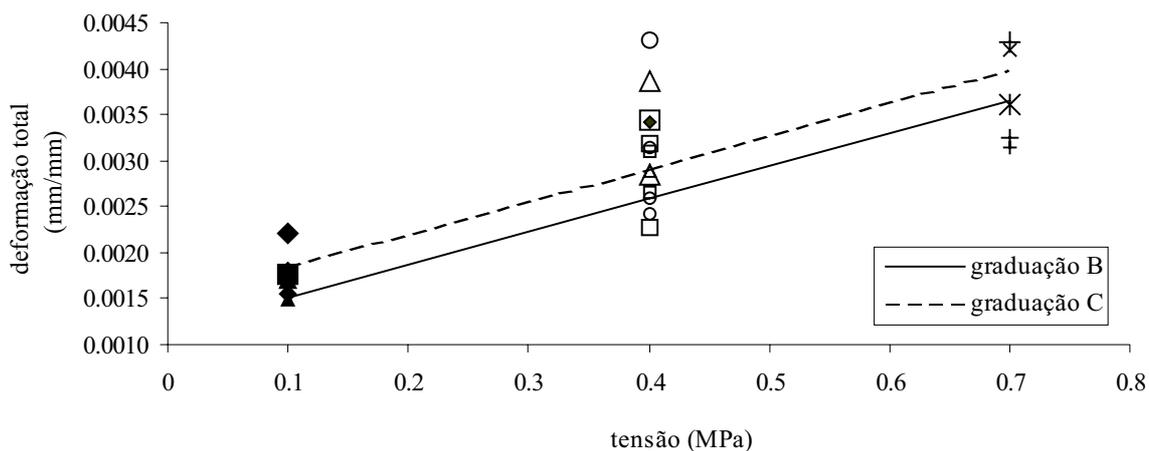


Figura 4.13 – Deformação total medida no ensaio de fluência por compressão uniaxial estática, em função da tensão do ensaio.

Observando-se a Figura 4.13 nota-se que a deformação total apresentada pelas misturas com distribuição granulométrica correspondente ao centro da faixa C foi sempre maior em relação a deformação total apresentada por misturas da faixa B. Essa figura evidencia também o aumento linear ocorrido na deformação total, com o aumento da tensão de ensaio.

Nas figuras 4.14 e 4.15 são apresentados os dados referentes à deformação recuperável obtidos no ensaio de fluência estática, para as graduações B e C, respectivamente, lançados em função do teor de asfalto utilizado na mistura.

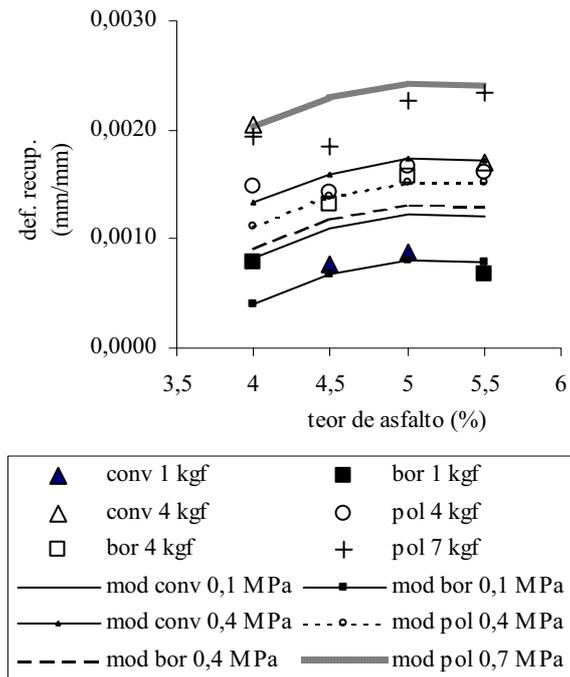


Figura 4.14 – Deformação recuperável determinada no ensaio de fluência estática, para a graduação B.

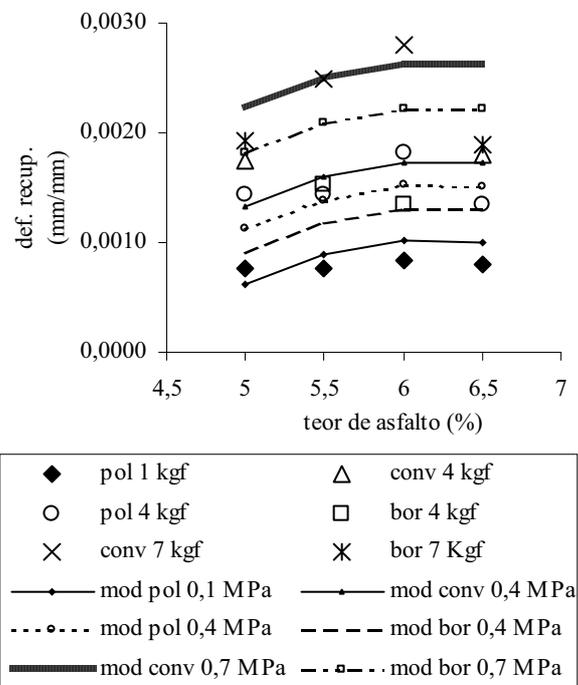


Figura 4.15 – Deformação recuperável determinada no ensaio de fluência estática, para a graduação C.

Os dados provenientes do ensaio de fluência por compressão uniaxial dinâmica permitiram a obtenção do modelo de regressão para o módulo de fluência com coeficiente de determinação, 0,84. Os dados referentes ao módulo de fluência dinâmica são apresentados nas figuras 4.16 e 4.17.

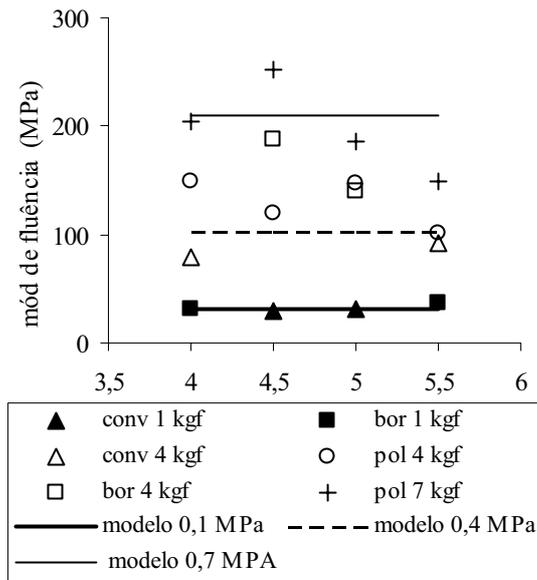


Figura 4.16 – Módulo de fluência determinado no ensaio de fluência dinâmica, para a graduação B.

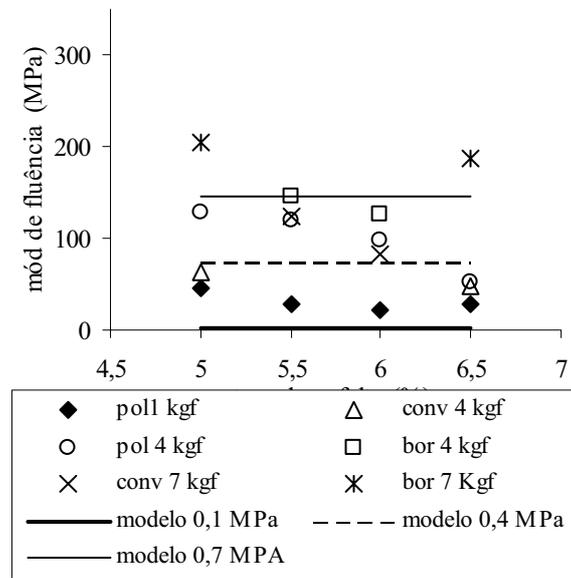


Figura 4.17 – Módulo de fluência determinado no ensaio de fluência dinâmica, para a graduação C.

Na Figura 4.16 foram apresentados os pontos experimentais e as curvas de regressão referentes às condições experimentais constituídas por agregados com distribuição granulométrica correspondente ao centro da faixa B, e na Figura 4.17, os dados referentes às condições experimentais constituídas por agregados com distribuição granulométrica correspondente ao centro da faixa C.

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES

5.1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo são expostas as conclusões sobre os resultados apresentados no capítulo anterior quanto à aplicação de asfaltos modificados em misturas asfálticas densas, à luz dos ensaios de fluência estática e dinâmica, e também quanto à utilização da técnica de fracionamento de experimentos fatoriais. Deve ser ressaltado que essas conclusões restringem-se às condições de ensaios e materiais utilizados neste trabalho.

5.2. ENSAIO MARSHALL

Através dos resultados obtidos do ensaio Marshall, pode-se concluir que:

- a) a distribuição granulométrica C apresentou teores ótimos de asfalto maiores que os da distribuição granulométrica B, para todos os asfaltos utilizados;
- b) para a distribuição granulométrica B, os valores de densidade aparente, volume de vazios e relação betume-vazios são muito próximos, independente do tipo de asfalto considerado;
- c) para a distribuição granulométrica C, as misturas asfálticas preparadas com asfalto modificado por borracha resultaram nos menores valores de densidade aparente;
- d) para a distribuição granulométrica C, os valores de volume de vazios para misturas com asfalto modificado por borracha são os mais elevados, exceto para os teores de 5% e 5,5%;

- e) os menores valores de fluência para a distribuição granulométrica C foram obtidos para misturas asfálticas com asfalto convencional;
- f) as misturas asfálticas confeccionadas com asfalto modificado por polímero SBS apresentaram os maiores valores de estabilidade, enquanto que os menores valores foram encontrados para misturas produzidas com asfalto modificado por borracha, para ambas distribuições granulométricas.

5.3. PLANEJAMENTO DE EXPERIMENTOS FATORIAIS

A utilização da técnica de planejamento de experimentos fatoriais é uma ferramenta interessante para estudos laboratoriais que envolvem grande número de fatores, pois permite uma diminuição drástica do número de ensaios a serem realizados. Entretanto, o fracionamento do experimento dificulta, de uma certa forma, a interpretação dos resultados, tornando imprescindível o uso de análise estatística para sua avaliação.

Nesta pesquisa, em função da dispersão de resultados obtidos para mesmos corpos-de-prova e entre réplicas, a interpretação dos resultados do fracionamento do experimento foi dificultada e ainda poucos dos modelos obtidos apresentaram bons coeficientes de correlação, o que acredita-se ser, em parte, devido a essa dispersão de resultados apresentada pelos ensaios de compressão uniaxial estática e dinâmica.

5.4. ENSAIO DE FLUÊNCIA POR COMPRESSÃO UNIAXIAL ESTÁTICA

Com base na análise de variância, as principais conclusões obtidas dos ensaios de fluência por compressão uniaxial estática são:

- a) os valores de deformação final e total mostraram-se sensíveis apenas às variações da tensão de ensaio e da distribuição granulométrica, portanto, o ensaio não foi capaz de distinguir misturas asfálticas com diferentes tipos

de asfalto; esperava-se que o teor de asfalto tivesse influência nos valores dessas deformações, o que não foi constatado;

- b) a deformação recuperável não se mostrou sensível à variação da distribuição granulométrica;
- c) esperava-se que a tensão do ensaio tivesse influência na inclinação do trecho entre 1000 s e 3600 s, fato esse também não constatado;
- d) o fator de maior influência para os módulos de fluência em 3600 s e 4500 s foi a tensão aplicada no ensaio.

5.5. ENSAIO DE FLUÊNCIA POR COMPRESSÃO UNIAXIAL DINÂMICA

As principais conclusões obtidas do ensaio de fluência por compressão uniaxial dinâmica, considerando-se a análise de variância, são:

- a) o ensaio foi capaz de distinguir misturas asfálticas com diferentes tipos de ligante, ou seja, ele foi capaz de detectar diferenças de comportamento entre as misturas induzidas pelo tipo de asfalto utilizado;
- b) o teor de asfalto mostrou-se significativo na deformação final e na inclinação do trecho entre 100 s e 5000 s;
- c) para a inclinação do trecho entre 100 s e 5000 s esperava-se que a tensão fosse significativa, porém isto não foi verificado;
- d) o teor de asfalto não se mostrou significativo no módulo de fluência para 5000 s.

5.6. CONCLUSÕES GERAIS

- a) À luz do ensaio Marshall verificou-se que as misturas asfálticas confeccionadas com asfalto modificado por borracha apresentaram os mais baixos valores quanto aos resultados de estabilidade; enquanto que os maiores valores foram obtidos pelas misturas com asfalto modificado por polímero SBS;

- b) O ensaio de fluência por compressão uniaxial estática mostrou-se capaz de distinguir diferenças de comportamento entre misturas asfálticas com diferentes distribuições granulométricas, mas não foi capaz de distinguir o efeito da adição de modificadores ao asfalto;
- c) O ensaio de fluência por compressão uniaxial dinâmica mostrou-se capaz de distinguir diferenças de comportamento entre misturas asfálticas elaboradas com diferentes tipos de ligantes;
- d) A tensão de ensaio não mostrou influência (não foi significativa) na inclinação do trecho entre 100 s e 5000 s do ensaio de fluência por compressão uniaxial dinâmica.

Como sugestões para trabalhos futuros pode-se indicar estudos com fracionamento menor, pois, deste modo, a análise dos resultados torna-se mais simples; estudos com aplicação de confinamento ao corpo-de-prova e também estudos onde a leitura das deformações seja feita no terço médio dos corpos-de-prova.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABEDA – Associação Brasileira das Empresas Distribuidoras de Asfaltos (2001). *Manual Básico de Emulsões Asfálticas*. Rio de Janeiro, ABEDA.
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas (1993). *Dosagem de misturas betuminosas pelo método Marshall – NBR 12891*. Rio de Janeiro, ABNT.
- BARTH, E.J. (1962). *Asphalt – Science and Technology*. Gordon and Breach Science Publishers, New York.
- BROWN, S.F. (1976). Laboratory testing for use in the prediction of rutting in asphalt pavements. *Transportation Research Record 616*, p. 22-27.
- BROWN, E.R.; BASSET, C.E. (1990). Effects of maximum aggregate size on rutting potential and other properties of asphalt-aggregate mixtures. *Transportation Research Record 1259*, p. 107-119.
- BRÛLÉ, B. (1996). Polymer-modified asphalt cements used in the road construction industry: basic principles. *Transportation Research Record 1535*, p. 48-53.
- CARLSON, D.D.; ZHU, H. (1999). Asphalt-rubber An anchor to crumb rubber markets. *Third joint UNCTAD/IRSG Workshop on Rubber and the Environment*, p. 1-30. International Rubber Forum, Veracruz, México.
- CARPENTER, S.H.; VANDAM, T. (1987). Laboratory performance comparisons of polymer-modified and unmodified asphalt concrete mixtures. *Transportation Research Record 1115*, p. 62-74.

- CARPENTER, S.H. (1992). Load equivalency factors and rutting rates: the AASHO Road Test. *Transportation Research Record 1354*, p. 31-38.
- CERATTI, J.A.; RUWER, P.M.; OLIVEIRA, J.A. (1996). Estudo do comportamento mecânico de concreto asfáltico com ligante modificado com polímero. *13º Encontro do Asfalto*, v.2, p. 290-303.
- CHARANIA, E.; CANO, J.O.; SCHNORMEIER, R.H. (1991). Twenty-year study of asphalt rubber pavements in Phoenix, Arizona. *Transportation Research Record 1307*, 29-38.
- CHOUBANE, B. (1999). Ten-year performance evaluation of asphalt-rubber surface mixes. *Transportation Research Record 1681*, p. 10-18.
- CHOWDHURY, A. et al. (1992). Effect of aggregate gradation on permanent deformation of Superpave HMA. *Transportation Research Board, 80th Annual Meeting*, p. 1-19.
- COELHO, V. (1994). Considerações sobre deformações permanentes em camadas asfálticas de pavimentação. *12º Encontro de Asfalto*, p. 179-184.
- 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.
- CONAMA (1999). Resolução nº 258, de 26 de agosto de 1999. Determina os prazos para coleta e destinação final, de forma ambientalmente adequada, de pneus descartados.

CORTÉ, J.F. et al. (1994). Investigation of rutting of asphalt surface layers: influence of binder and axle loading configuration. *Transportation Research Record 1436*, p. 28-37.

CROSS, S.A.; BROWN, E.R. (1992). Selection of aggregate properties to minimize rutting of heavy duty. *Effects of aggregates and mineral fillers on asphalt mixture performance, American Society for Testing and Materials, ASTM STP 1147*, p. 45-67.

DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (1994). *Procedimento DNER-PRO 008/94. Avaliação objetiva da superfície de pavimentos flexíveis e semi-rígidos*. Rio de Janeiro, DNER.

DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (1994). *Método de ensaio DNER-ME 78/94. Agregado graúdo – adesividade a ligante betuminoso*. Rio de Janeiro, DNER.

DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (1994). *Método de ensaio DNER-ME 79/94. Agregado – adesividade a ligante betuminoso*. Rio de Janeiro, DNER.

DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (1994). *Método de ensaio DNER-ME 117/94. Mistura betuminosa – determinação da densidade aparente*. Rio de Janeiro, DNER.

DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (1994). *Método de ensaio DNER-ME 84/95. Agregado miúdo – determinação da densidade real*. Rio de Janeiro, DNER.

DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (1998). *Pesquisa de asfaltos modificados por polímeros – Relatório Final. Tomo I e II.*

DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (1998). *Método de ensaio DNER-ME 35/98. Agregados – determinação da abrasão “Los Angeles”.* Rio de Janeiro, DNER.

DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (1999). *Especificação de serviço DNER-ES 385/99. Pavimentação – Concreto asfáltico com asfalto polímero – Norma Rodoviária.* Rio de Janeiro, DNER.

DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (2000). *Especificação de serviço DNER-ES 313/97. Pavimentação – Concreto betuminoso – Norma Rodoviária.* Rio de Janeiro, DNER.

DUNN, O.J., CLARK, V.A. (1987). *Applied statistics: Analysis of variance and regression.* John Wiley e Sons. 2ª ed.

ECOLOGIA EM NOTÍCIAS URGENTE (2002) – disponível em <<http://www.riosvivos.org.br/urgente210320.htm>>.

EPSS, J.A.; GALLAWAY, B.M.; WILLIAM, W.S. (1970). Long-term compaction of asphalt concrete pavements. *Highway Research Record 313*, p. 79-91.

ESCH, D.C. (1982). Construction and benefits of rubber-modified asphalt pavements. *Transportation Research Record 860*, p. 5-13.

FHWA – Federal Highway Administration (2001). *Superpave Mixture – Design Guide.* Washington, DC, FHWA.

- HANSON, D.I. et al. (1994). Evaluation and characterization of a rubber-modified hot mix asphalt pavement. *Transportation Research Record 1436*, p. 98-107.
- HEITZMAN, M. (1992). Design and construction of asphalt paving materials with crumb rubber modifier. *Transportation Research Record 1339*, p. 1-8.
- HILLS, J.F. (1973). The creep of asphalt mixes. *Journal of Institute of Petroleum*, v. 59, n. 570, p. 247-262.
- HUBBARD, P.; GRAY, B.E. (1937). *Asfalto – Manual de bolso para engenheiros rodoviários*.
- HUBBER, G.A. (1999). Methods to achieve rut-resistant durable pavements. National Cooperative Highway Research Program. Synthesis of Highway Practice 274, p. 1-61.
- HUFF, B.J.; VALLERGA, B.A. (1981). Characteristics and performance of asphalt-rubber material containing a blend of reclaim and crumb rubber. *Transportation Research Record 821*, p. 29-37.
- IBP – Instituto Brasileiro de Petróleo (1996). *Informativo “O Asfalto”*. Rio de Janeiro, p. 1-6.
- ISACSSON, U.; LU, X. (1995). Testing and appraisal of polymer modified road bitumens – state of art. *Materials and Structures*, v. 28, p. 139-159.
- KAMEL, N.I.; MILLER, L.J. (1994). Comparative performance of pavement mixes containing conventional and engineered asphalts. *Transportation Research Record 1454*, p. 172-180.

- KANDHAL, P.S.; CROSS, S.A.; BROWN, E.R. (1993). Heavy-duty asphalt pavements in pennsylvania: evaluation for rutting. *Transportation Research Record 1384*, p. 49-58.
- KANDHAL, P.S.; COOLEY, L.A.JR. (2002). Coarse versus fine-graded Superpave mixtures: comparative evaluation of resistance to rutting. *Transportation Research Board, 81st Annual Meeting*, p. 1-23.
- KHOSLA, N.P. (1991). Effect of the use of modifiers on performance of asphaltic pavements. *Transportation Research Record 1317*, p.10-22.
- KIM, Y.R.; KIM, N.; KHOSLA, N.P. (1992). Effects of aggregate type and gradation on fatigue and permanent deformation of asphalt concrete. *Effects of aggregates and mineral fillers on asphalt mixture performance, American Society for Testing and Materials, ASTM STP 1147*, p. 310-328.
- LAI, J.S.; HUFFERD, W.L. (1976). Predicting permanent deformation of asphalt concrete from creep tests. *Transportation Research Record 616*, p. 41-43.
- LITTLE, D.N.; BUTTON, J.W.; YOUSSEF, H. (1993). Development of criteria to evaluate uniaxial creep data and asphalt concrete permanent deformation potential. *Transportation Research Record 1417*, p. 49-57.
- LU, X.; ISACSSON, U. (1997). Rheological characterization of styrene-butadiene-styrene copolymer modified bitumens. *Construction and Building Materials*, v. 11, n. 1, p. 23-32.
- MAJIDZADEH, K.; KHEDR, S.; GUIRGUIS, H. (1976). Laboratory verification of a mechanistic subgrade rutting model. *Transportation Research Record 616*, p. 34-37.

- MAJIDZADEH, K.; KHEDR, S. (1979). Evaluation of permanent deformation in asphalt concrete pavements. *Transportation Research Record 715*, p. 21-31.
- MARKS, J.V.; MONROE, R.W.; ADAM, J.F. (1991). Relating creep testing to rutting of asphalt concrete mixes. *Transportation Research Record 1307*, p. 75-81.
- MARTINHO, F.G.; MONTENEGRO, F.G.; TRAJANO, L. (1994). Coperflex asphalt – Uma combinação asfalto e elastômero. *12º Encontro de Asfalto*, p. 281-291.
- MEDINA, J. (1997). *Mecânica dos pavimentos*. Rio de Janeiro, UFRJ.
- MEYER, F.; HAAS, F.; DHARMAWARDENE, M.W.W. (1976). Procedure for predicting rut depths in flexible pavements. *Transportation Research Record 616*, p. 38-40.
- MOHAMED, H.H.; YUE, Z. (1994). Criteria for evaluation of rutting potential based on repetitive uniaxial compression test. *Transportation Research Record 1454*, p. 74-81.
- MOMM, L.; DOMINGUES, F.A.A. (1996). Efeitos da graduação dos agregados nas misturas asfálticas. *30ª Reunião Anual de Pavimentação*, p. 86-113.
- MONISMITH, C.L. (1976). Rutting prediction in asphalt concrete pavements. *Transportation Research Record 616*, p. 2-8.
- MONISMITH, C.L. (1992). Analytically based asphalt pavement design and rehabilitation: theory to practice, 1962-1992. *Transportation Research Record 1354*, p. 5-26.

- MORRIS, G.R.; McDONALD, C.H. (1976). Asphalt-rubber stress-absorbing membranes: field performance and state of the art. *Transportation Research Record 595*, p. 52-58.
- MORRIS, G.R.; CHEN, N.J.; VITO, J.A. (1982). Application of asphalt rubber on new highway pavement construction. *Transportation Research Record 888*, p. 43-47.
- MOTA, L.M.G.; PINTO, S. (1994). O uso de ensaios estáticos na definição de parâmetros de comportamento das misturas asfálticas. *12º Encontro de Asfalto*, p. 152-177.
- OLIVER, J.W.H. et al. (1997). Evaluation of rut-resistant properties of asphalt mixes under field and laboratory conditions. *Transportation Research Record 1590*, p. 53-61.
- OTENG-SEIFAH, S.; MANKE, P.G. (1976). Study of rutting in flexible highway pavements in Oklahoma. *Transportation Research Record 602*, p. 97-99.
- PAGE, G.C.; RUTH, B.E.; WEST, R.C. (1992). Florida's approach using ground tire rubber in asphalt concrete mixtures. *Transportation Research Record 1339*, p. 16-29.
- PARKER, F.; BROWN, E.R. (1992). Effects of aggregate properties on flexible pavement rutting in Alabama. *Effects of aggregates and mineral fillers on asphalt mixture performance, American Society for Testing and Materials, ASTM STP 1147*, p. 68-89.
- QI, X.; WITCZAK, M.W. (1998). Time-dependent permanent deformation models for asphaltic mixtures. *Transportation Research Record 1639*, p. 83-93.

- RAMOS, C.R. (1996). Asfalto modificado com polímero – Uma opção para melhoria dos asfaltos nacionais. 13º Encontro de Asfalto, p. 60-81.
- SALTER, J.; MAT, J. (1990). Some effects of rubber additives on asphalt mixes. *Transportation Research Record 1269*, p. 79-86.
- SHULER, S. (1982). Specification requirements for asphalt-rubber. *Transportation Research Record 843*, p. 1-4.
- SMITH, H.A. (1991). Truck tire characteristics and asphalt concrete pavement rutting. *Transportation Research Record 1307*, p. 1-7.
- SRIVASTAVA, A.; HOPMAN, P.C.; MOLENAAR, A.A.A. (1992). SBS polymer modified asphalt binder and its implications on overlay design. *Polymer Modified Asphalt Binders, American Society for Testing and Materials, ASTM STP 1108*, p. 309-329.
- STEPHENS, J.E. (1982). Field evaluation of rubber-modified bituminous concrete. *Transportation Research Record 843*, p. 11-21.
- TAKALLOU, H.B.; HICKS, R.G. (1988). Development of improved mix and construction guidelines for rubber-modified asphalt pavements. *Transportation Research Record 1171*, p. 113-120.
- TAKALLOU, M.B.; TAKALLOU, H.B. (1991). Benefits of recycling waste tires in rubber asphalt paving. *Transportation Research Record 1310*, p. 87-92.

- TAYEBALI, A.A. ET AL. (1992). Influence of rheological properties of modified asphalt binders on the load deformation characteristics of the binder-aggregate. *Polymer Modified Asphalt Binders, American Society for Testing and Materials, ASTM STP 1108*, p. 77-96.
- TERREL, R.L. et al. (1971). Traffic-induced permanent deformation. *Highway Research Board – Special Report 126*, p. 48-50.
- THOMPSON, P.D. (1969). Merits of adding natural rubber to bituminous road surfacing materials. *Highway Research Record 273*, p. 87-95.
- ULMGREN, N. (1996). Functional testing of asphalt mixes for permanent deformation by dynamic creep test – Modification of method and round robin test. EAPA / Eurobitume Congress, Strasbourg 7-10 May 1996.
- VALKERING C.P. et al. (1990). Rutting resistance of asphalt mixes containing non-conventional and polymer-modified binders. *Symposium – Improved Rut Resistance, Association of Asphalt Paving Technologists (AAPT), Proceedings*, v. 43, p. 253-258.
- VAN DE LOO (1974). Creep testing, a simple tool to judge asphalt mix stability. *Association of Asphalt Paving Technologists (AAPT), Proceedings*, v. 43, p. 253-258.
- VAN DE LOO, P.J. (1976). Practical approach to the prediction of rutting in asphalt pavements: the Shell Method. *Transportation Research Record 616*, p. 15-21.
- VAN DE LOO, P.J. (1978). The creep test: a key tool in asphalt mix design and in prediction of pavement rutting. *Association of Asphalt Paving Technologists (AAPT), Proceedings*, v. 47, p. 522-557.

VERGA, C.; BATTIATO,G.; LA BELLA, C. (1974). Labotatory evaluation of rheological behavior of an asphalt concrete containing an SBR elastomer. *Transportation Research Record 515*, p. 105-113.

VIANNA, A.D.A.; MOTTA, L.M.G.; DOMINGUES, R.G. (2003). Ensaio de compressão axial de CBUQ – Uma nova técnica de medição das deformações. *XVII ANPET*, p. 30-40.

WEST, R.C. et al. (1998). Effect of tire rubber grinding method on asphalt-rubber binder characteristics. *Transportation Research Record 1638*, p. 134-140.