

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO - USP**  
**ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS - EESC**  
**DEPARTAMENTO DE TRANSPORTES - STT**

**ESTUDOS DE MISTURAS ASFÁLTICAS DENSAS COM**  
**AGREGADOS DO ESTADO DO PARÁ, UTILIZANDO ASFALTO**  
**CONVENCIONAL (CAP-40) E ASFALTO MODIFICADO COM**  
**POLÍMERO SBS (BETUFLEX B 65/60)**

**SIMONNE DA COSTA AMARAL**

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

**ORIENTADOR: Prof. Glauco Túlio Pessa Fabbri**

SÃO CARLOS

2000

## AGRADECIMENTOS

---

Agradeço do fundo do meu coração ao M.A.G. sem o qual não teria força de vontade para terminar este mestrado. À minha família pelo eterno segurar de mão e ao Roberto por sua paciência, muito obrigada a todos.

Ao Prof. Glauco Fabbri, pela orientação durante o desenvolvimento deste trabalho.

Aos técnicos do laboratório de Estradas da E.E.S.C./U.S.P., pela colaboração na execução dos ensaios de laboratório.

À Profa. Liedi Bernucci da POLI/USP, o meu muito obrigada por tudo.

Ao Prof. Edson de Moura da FATEC e tecnólogo do Lab. de Pavimentação do PTR/POLI/USP, pela sua amizade que não tem preço e por seu suporte técnico de todas as horas, muito obrigada.

Ao colega da POLI Helder de Godoy por seu constante apoio e ajuda técnica.

Ao CEFET-Pará, em nome do Prof. Sérgio Cabeça Braz, pela amizade e suporte financeiro sem o qual não teria condições de residir em São Carlos, muito obrigada.

À CAPES pela concessão da bolsa de estudos de quatro meses, viabilizando parte do custeio da minha estada em São Carlos.

À ESTACON Eng<sup>a</sup>, em nome do Eng<sup>o</sup> Lara, dos Técnicos em Estradas Srs. Jadeir, Cícero Pedro e Alex, bem como dos demais colegas do laboratório de Asfalto central e de Americano-Pa, incluindo as estagiárias Jucenilda e Alessandra, pelo fornecimento de material, pelo incentivo e amizade com que sempre me trataram, obrigada.

À Ipiranga Asfaltos S.A., pelo fornecimento dos ligantes utilizados nesta pesquisa bem como pelo suporte técnico do Eng<sup>o</sup> Químico Rafael Martins e dos Químicos Emerson Maciel e Priscila Ambiel do Lab. de Desenvolvimento Tecnológico.

Ao Sr. Ivo Cardoso, da Ivo Wild Representações LTDA, pela amizade sincera e pela ajuda com o transporte dos materiais até São Carlos, muito obrigada.

A todos os amigos e colaboradores que de uma forma ou de outra ajudaram na realização deste trabalho.

## SUMÁRIO

---

	<b>página</b>
LISTA DE FIGURAS.....	viii
LISTA DE TABELAS.....	xiii
RESUMO.....	xvii
ABSTRACT.....	xviii
<b>CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
1.1 – ENQUADRAMENTO TEMÁTICO.....	1
1.1.1 – O transporte rodoviário no Estado do Pará.....	1
1.1.2 – Justificativa para o uso de misturas betuminosas modificadas no Estado do Pará.....	3
1.2 – OBJETIVOS DO TRABALHO.....	4
1.3 – AÇÕES DESENVOLVIDAS.....	4
1.4 – ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO.....	5
<b>CAPÍTULO 2: REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>7</b>
2.1 – INTRODUÇÃO.....	7
2.2 – ASFALTO.....	8
2.2.1 – Materiais Betuminosos.....	8
2.2.2 – Asfalto de Petróleo.....	9
2.2.3 – Química do Asfalto.....	11

2.2.4 – Reologia do asfalto.....	14
2.2.4.1 – Visco-elasticidade linear.....	15
2.2.4.1.1 – Modelos básicos.....	17
2.2.4.1.2 – Materiais visco-elásticos simples.....	18
2.2.4.1.3 – Modelos complexos.....	19
2.2.4.1.4 – Visco-elasticidade de asfaltos modifi - cados por polímeros.....	22
2.3 – MODIFICADORES DE ASFALTO.....	22
2.3.1 – Introdução.....	22
2.3.2 – Principais modificadores de asfalto.....	23
2.3.2.1 – Borrachas.....	26
2.3.2.2 – E.V.A. – etileno-acetato de vinila.....	27
2.3.2.3 – S.B.S. – estireno-butadieneo-estireno.....	28
2.4 – ASFALTO MODIFICADO.....	30
2.4.1 – Introdução.....	30
2.4.2 – Propriedades.....	33
2.4.3 – Experiências de campo.....	35
2.5 – PRINCIPAIS DEGRADAÇÕES SOFRIDAS PELO PAVIMENTO FLEXÍVEL.....	40
2.5.1 – Introdução.....	40
2.5.2 – Deformação Permanente.....	40
2.5.3 – Fadiga.....	44

### **CAPÍTULO 3: MISTURAS BETUMINOSAS – CONCRETO**

#### **ASFÁLTICO CONVENCIONAL E**

#### **MODIFICADO POR POLÍMERO.....**

3.1 – INTRODUÇÃO.....	47
3.2 – MATERIAIS.....	48
3.2.1 – Agregados.....	49
3.2.2 – Material de enchimento (filler).....	51
3.2.3 – Aglutinantes.....	53

3.2.4 – Melhorador de adesividade.....	59
3.3 – PROPRIEDADES MECÂNICAS.....	61
3.4 – ENSAIOS AVALIADORES DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS.....	62
3.5 – SELEÇÃO DOS MÉTODOS DE ENSAIO PARA A PRESENTE PESQUISA.....	63
3.6 – ENSAIO MARSHALL.....	63
3.7 – FLUÊNCIA POR COMPRESSÃO UNIAXIAL ESTÁTICA.....	67
3.8 – ENSAIO PARA DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL.....	74
3.9 – MÓDULO DE RESILIÊNCIA POR COMPRESSÃO DIAMETRAL.....	77
<b>CAPÍTULO 4: PROGRAMA EXPERIMENTAL REALIZADO.....</b>	<b>81</b>
4.1 – INTRODUÇÃO.....	81
4.2 – MATERIAIS EMPREGADOS NA PESQUISA.....	81
4.2.1 – Natureza e procedência.....	81
4.2.1.1 – Agregados.....	82
4.2.1.2 – Material de enchimento.....	86
4.2.1.3 – Aglutinantes.....	87
4.2.1.4 – Melhorador de adesividade.....	88
4.3 – DESCRIÇÃO DOS ENSAIOS REALIZADOS.....	88
4.3.1 – Seleção, manuseio e preparação dos agregados.....	89
4.3.2 – Seleção, manuseio e preparação dos aglutinantes.....	90
4.3.3 – Dosagem da mistura betuminosa.....	91
4.3.4 – Moldagem dos corpos-de-prova.....	93
4.3.5 – Ensaio Marshall.....	94
4.3.6 – Ensaio de fluência por compressão uniaxial estática.....	97
4.3.7 – Ensaio para determinação da resistência à tração por compressão diametral.....	99
4.3.8 – Ensaio de módulo de resiliência por compressão diametral.	100

<b>CAPÍTULO 5: APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS DOS ENSAIOS DE LABORATÓRIO.....</b>	<b>103</b>
5.1 – INTRODUÇÃO.....	103
5.2 – ESTIMATIVA DA PORCENTAGEM ÓTIMA DOS LIGANTES ASFÁLTICOS.....	103
5.3 – ENSAIOS MARSHALL.....	107
5.4 – ENSAIOS DE FLUÊNCIA POR COMPRESSÃO UNIAXIAL ESTÁTICA.....	112
5.5 – ENSAIOS DE DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL.....	122
5.6 – ENSAIOS DE DETERMINAÇÃO DO MÓDULO DE RESILIÊNCIA POR COMPRESSÃO DIAMETRAL.....	125
5.7 – ANÁLISE ESTATÍSTICA.....	129
<b>CAPÍTULO 6: CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....</b>	<b>134</b>
6.1 – INTRODUÇÃO.....	134
6.2 – ENSAIO MARSHALL.....	134
6.3 – ENSAIO DE FLUÊNCIA POR COMPRESSÃO UNIAXIAL ESTÁTICA.....	135
6.4 – ENSAIO DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL.....	136
6.5 – ENSAIO DE MÓDULO DE RESILIÊNCIA POR COMPRESSÃO DIAMETRAL.....	136
6.6 – CONCLUSÃO GERAL.....	137
6.7 – RECOMENDAÇÕES PARA PESQUISAS FUTURAS.....	138
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>139</b>
<b>ANEXOS:</b>	
ANEXO I: OFÍCIO DO 2º DISTRITO RODOVIÁRIO FEDERAL	

ANEXO II: CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DOS CORPOS-DE-  
PROVA

ANEXO III: RESULTADOS DOS ENSAIOS MARSHALL

ANEXO IV: RESULTADOS DOS ENSAIOS DE FLUÊNCIA POR  
COMPRESSÃO UNIAXIAL ESTÁTICA

ANEXO V : RESULTADOS DOS ENSAIOS PARA DETERMINA-  
ÇÃO DA RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRES-  
SÃO DIAMETRAL

ANEXO VI: RESULTADOS DOS ENSAIOS DE MÓDULO DE  
RESILIÊNCIA POR COMPRESSÃO DIAMETRAL



## LISTA DE FIGURAS

---

	<b>página</b>
FIGURA 1.1 – Localização das rodovias BR-316 e BR-010, esc. aprox. 1:13M (HOMEPAGE DO MINISTÉRIO DOS TRANSPORTES EM 27/03/2000) .....	2
FIGURA 2.1 – Torre de fracionamento do petróleo (IBP, 1994).....	10
FIGURA 2.2 – Elemento de Hooke e elemento de Newton .....	17
FIGURA 2.3 – Líquido de Maxwell e sólido de Kelvin .....	18
FIGURA 2.4 – Curvas de fluência e de recuperação do líquido de Maxwell e do sólido de Kelvin.....	19
FIGURA 2.5 – Modelo reológico de Burger.....	20
FIGURA 2.6 – Curva de fluência e de recuperação do modelo reológico de Burger.....	20
FIGURA 4.1 – Vista geral da jazida Santo Amaro.....	82
FIGURA 4.2 – Jazida Santo Amaro.....	82
FIGURA 4.3 – Mapa da região onde ficam as jazidas.....	84
FIGURA 4.4 – Granulometria dos agregados.....	85
FIGURA 4.5 – Faixa granulométrica – “Faixa C” do DNER (DNER – ES 313/97/ DNER – ES 385/99).....	85
FIGURA 4.6 – Agregados e material de enchimento usados nos corpos-de-prova.....	87

FIGURA 4.7 –	Fotografia do equipamento para determinação de módulo de resiliência por compressão diametral usado na pesquisa.....	101
FIGURA 4.8 –	Fotografia do dispositivo centralizador de corpo-de-prova do equipamento para determinação de módulo de resiliência por compressão diametral.....	102
FIGURA 5.1 -	Valores médios do volume de vazios calculados para todos os corpos-de-prova moldados com asfalto convencional.....	104
FIGURA 5.2 -	Valores médios do volume de vazios calculados para todos os corpos-de-prova moldados com asfalto modificado.....	104
FIGURA 5.3 -	Valores médios da densidade aparente para todos os corpos-de-prova moldados com asfalto convencional	105
FIGURA 5.4 -	Valores médios da densidade aparente para todos os corpos-de-prova moldados com asfalto modificado...	105
FIGURA 5.5 -	Valores médios da relação betume/vazios para todos os corpos-de-prova moldados com asfalto convencional.....	106
FIGURA 5.6 -	Valores médios da relação betume/vazios para todos os corpos-de-prova moldados com asfalto modificado.....	106
FIGURA 5.7 -	Valores médios das densidades aparentes para as misturas com asfalto convencional e modificado.....	108
FIGURA 5.8 -	Valores médios das estabilidades Marshall para as misturas moldadas com asfalto convencional e com asfalto modificado.....	109
FIGURA 5.9 -	Valores médios das fluências Marshall para as misturas moldadas com asfalto convencional e com asfalto modificado.....	110
FIGURA 5.10 -	Valores médios dos volumes de vazios para as misturas com asfalto convencional e com asfalto	

	modificado.....	110
FIGURA 5.11 -	Valores médios das relações betume/vazios para as misturas com asfalto convencional e com asfalto modificado.....	111
FIGURA 5.12 -	Capacidade de suporte Marshall para as misturas com asfalto convencional e asfalto modificado.....	111
FIGURA 5.13 -	Densidades aparentes médias dos corpos-de-prova usados nos ensaios de fluência por compressão uniaxial estática, para as misturas com asfalto convencional e modificado.....	113
FIGURA 5.14 -	Volumes de vazios médios dos corpos-de-prova usados nos ensaios de fluência por compressão uniaxial estática, para as misturas com asfalto convencional e modificado.....	114
FIGURA 5.15 -	Valores médios das relações betume/vazios nas misturas com asfalto convencional e com asfalto modificado.....	114
FIGURA 5.16 -	Valores médios das deformações totais para misturas moldadas com asfalto convencional e com asfalto modificado.....	115
FIGURA 5.17 -	Valores médios das deformações viscoplásticas para misturas moldadas com asfalto convencional e com asfalto modificado.....	116
FIGURA 5.18 -	Valores médios das deformações elásticas para misturas moldadas com asfalto convencional e com asfalto modificado.....	116
FIGURA 5.19 -	Valores médios dos módulos de fluência para misturas moldadas com asfalto convencional e com asfalto modificado.....	117
FIGURA 5.20 -	Resultados médios da deformação axial para os ensaios de fluência estática para misturas com 4,0% de ligante.....	117

FIGURA 5.21 - Resultados médios da deformação axial para os ensaios de fluência estática para misturas com 4,5% de ligante.....	118
FIGURA 5.22 - Resultados médios da deformação axial para os ensaios de fluência estática para misturas com 5,0% de ligante.....	118
FIGURA 5.23 - Resultados médios da deformação axial para os ensaios de fluência estática para misturas com 5,5% de ligante.....	119
FIGURA 5.24 - Resultados médios da deformação axial para os ensaios de fluência estática para misturas com 6,0% de ligante.....	119
FIGURA 5.25 - Parâmetro “a” das curvas de fluência por compressão uniaxial estática.....	121
FIGURA 5.26 - Parâmetro “b” das curvas de fluência por compressão uniaxial estática.....	121
FIGURA 5.27 - Densidades aparentes médias dos corpos-de-prova usados na determinação da resistência à tração por compressão diametral para as duas misturas com asfaltos convencional e modificado.....	123
FIGURA 5.28 - Valores médios do volume de vazios dos corpos-de-prova utilizados na determinação da resistência à tração.....	124
FIGURA 5.29 - Valores médios da relação betume/vazios dos corpos-de-prova utilizados na determinação da resistência à tração.....	124
FIGURA 5.30 - Valores médios da resistência à tração para misturas com asfaltos convencional e modificado.....	125
FIGURA 5.31 - Valores médios das densidades aparentes dos corpos-de-prova utilizados nos ensaios de determinação do módulo de resiliência.....	127
FIGURA 5.32 - Valores médios do volume de vazios dos corpos-de-	

	prova utilizados nos ensaios de determinação do módulo de resiliência.....	127
FIGURA 5.33 -	Valores médios da relações betume/vazios dos corpos-de-prova utilizados nos ensaios de determinação do módulo de resiliência.....	128
FIGURA 5.34 -	Valores médios dos módulos de resiliência por compressão diametral para misturas moldadas com asfaltos convencional e modificado.....	128

## LISTA DE TABELAS

---

	<b>página</b>
TABELA 2.1 - Fatores que influem nas deformações permanentes (D.P.) das misturas para concreto asfáltico (SOUZA et al <sup>3</sup> apud COELHO, 1994).....	42
TABELA 3.1 - Exigências para o agregado graúdo (DNER – ES 313/97/ DNER – ES 385/99).....	49
TABELA 3.2 - Composição da mistura (DNER – ES 313/97/ DNER – ES 385/99).....	50
TABELA 3.3 - Granulometria do filler (DNER – EM 367/97).....	51
TABELA 3.4 - Classificação dos cimentos asfálticos de petróleo (Regulamento técnico DNC 01/92 – revisão 02).....	54
TABELA 3.5 - Especificação técnica para o CAP-40, classificação por viscosidade (Regulamento técnico DNC 01/92 – revisão 02).....	56
TABELA 3.6 - Especificação técnica para o cimento asfáltico modificado por polímero (DNER-EM 396/99).....	57
TABELA 3.7 - Ficha técnica do Betuflex (Reis & Santos, 1999).....	58
TABELA 3.8 - Ensaio Marshall – valores limites (DNER-ES 313/97).....	64
TABELA 3.9 - Ensaio Marshall – valores limites (DNER-ES 385/99).....	65

TABELA 3.10 - Exemplos de valores de módulo de rigidez, obtidos do ensaio de <i>creep</i> estático, para limitação da ocorrência de deformação permanente (SOUZA et al <sup>3</sup> apud COELHO, 1996).....	70
TABELA 3.11 - Avaliação das misturas betuminosas com $b$ , $\xi_{vp}$ . (MAHBOUB & LITTLE apud LITTLE et al, 1993).....	72
TABELA 3.12 - Avaliação de misturas betuminosas através dos módulos de rigidez à fluência - ( $M_F$ ). (MAHBOUB & LITTLE apud LITTLE et al, 1993).....	73
TABELA 3.13 - Intervalos de variação para a resistência à tração. (PINTO & PREUSLLER, 1980).....	76
TABELA 3.14 - Intervalos de variação para o módulo de resiliência (PINTO & PREUSLLER, 1980).....	79
TABELA 4.1 - Características físicas dos agregados usados na pesquisa....	86
TABELA 4.2 - Características físicas do CAP-40 e do Betuflex B 65/60 ...	88
TABELA 4.3 - Quantidade de agregados e de filler para composição de um corpo-de-prova.....	90
TABELA 5.1 - Resultados médios dos ensaios Marshall para as misturas com asfalto convencional.....	107
TABELA 5.2 - Resultados médios dos ensaios Marshall para as misturas com asfalto modificado.....	107
TABELA 5.3 - Resultados médios dos ensaios de fluência estática para as misturas moldadas com asfalto convencional.....	112
TABELA 5.4 - Resultados médios dos ensaios de fluência estática para as misturas moldadas com asfalto modificado.....	112
TABELA 5.5 - Parâmetros das curvas de fluência por compressão uniaxial estática.....	120
TABELA 5.6 - Resultados médios das resistências à tração por compressão diametral para as misturas moldadas com	

	asfalto convencional.....	122
TABELA 5.7 -	Resultados médios das resistências à tração por compressão diametral para as misturas moldadas com asfalto modificado.....	122
TABELA 5.8 -	Resultados médios dos ensaios de módulo de resiliência por compressão diametral para as misturas moldadas com asfalto convencional.....	125
TABELA 5.9 -	Resultados médios dos ensaios de módulo de resiliência por compressão diametral para as misturas com asfalto modificado.....	126
TABELA 5.10 -	Média, desvio-padrão e coeficiente de variação das densidades aparentes para todos os corpos-de-prova.....	129
TABELA 5.11 -	Média, desvio-padrão e coeficiente de variação dos volumes de vazios para todos os corpos-de-prova.....	129
TABELA 5.12 -	Média, desvio-padrão e coeficiente de variação das relações betume/vazios para todos os corpos-de-prova.....	130
TABELA 5.13 -	Média, desvio-padrão e coeficiente de variação das estabilidades Marshall.....	130
TABELA 5.14 -	Média, desvio-padrão e coeficiente de variação das fluências Marshall.....	130
TABELA 5.15 -	Média, desvio-padrão e coeficiente de variação das capacidades de suporte Marshall.....	131
TABELA 5.16 -	Média, desvio-padrão e coeficiente de variação das deformações totais.....	131
TABELA 5.17 -	Média, desvio-padrão e coeficiente de variação das deformações viscoplásticas.....	132
TABELA 5.18 -	Média, desvio-padrão e coeficiente das deformações elásticas.....	132
TABELA 5.19 -	Média, desvio-padrão e coeficiente de variação dos módulos de fluência.....	132



TABELA 5.20 - Média, desvio-padrão e coeficiente de variação das resistências à tração por compressão diametral.....	133
TABELA 5.21 - Média, desvio-padrão e coeficiente dos módulos de resiliência por compressão diametral.....	133

## RESUMO

---

Este trabalho teve como objetivo avaliar as vantagens ou desvantagens de utilizar-se asfalto modificado com polímero em misturas densas com seixo rolado como agregado graúdo. Para o experimento foram moldados setenta e cinco corpos-de-prova com asfalto convencional (CAP-40) e setenta e cinco corpos-de-prova com asfalto modificado (BETUFLEX B 65/60) e avaliados à luz dos ensaios Marshall, fluência por compressão uniaxial estática à 40°C, resistência à tração por compressão diametral e módulo de resiliência por compressão diametral à 25°C. Os resultados dos ensaios Marshall e de resistência à tração acusaram um melhor desempenho das misturas com asfalto modificado. As relações  $MR/\sigma_t$  encontradas para as ambas as misturas sugerem, a princípio, um melhor comportamento para as misturas modificadas. Os resultados dos ensaios de fluência por compressão uniaxial estática, no que tange à deformação elástica, detectou também uma *performance* superior das misturas com asfalto modificado em três teores de ligante dos cinco teores analisados, entretanto, para as demais propriedades, deformação total, deformação viscoplástica e módulo de fluência as misturas com asfalto convencional saíram-se melhor.

Palavras chave: Polímero SBS, asfaltos modificados, deformação permanente, misturas asfálticas.

## ABSTRACT

---

This research intends to analyze the advantages of hot-mix asphalt mixtures composed by polymer modified binder and gravel in relation to those made with conventional binder. To achieve the objective, there were compacted seventy five specimens with conventional binder and seventy five specimens with SBS polymer modified binder (BETUFLEX B™ 65/60) and were performed Marshall tests, static creep (40°C) tests, indirect tensile strength tests and resilient modulus by indirect tensile (25°C) tests. The results of Marshall and tensile strength tests showed a better performance of the polymer modified asphalt mixes than that presented by the conventional asphalt ones. The results from the relation of resilient modulus by indirect tensile and indirect tensile strength tests probably showed that the modified asphalt mixes have the best performance. The elastic strains from static creep tests also showed a better performance of the polymer modified mixes in three of the five binder contents, however, the others properties from static creep tests like as total strain, viscoplastic strain and creep modulus showed that the conventional asphalt mixes have the best performance.

Keywords: SBS polymer, modified binders, permanent deformation, asphalt mixtures.

# CAPÍTULO 1

## INTRODUÇÃO

---

### 1.1 – ENQUADRAMENTO TEMÁTICO

#### 1.1.1 – O transporte rodoviário no Estado do Pará

Segundo o Ministério dos Transportes, em sua homepage <http://www.transportes.gov.br/>, o Estado do Pará serve-se de uma rede de transporte composta por rodovias, ferrovias e hidrovias. O subsistema rodoviário conta com 3.400 Km de rodovias pavimentadas e 30.900 Km de rodovias não pavimentadas. Das rodovias pavimentadas, 840 Km são rodovias federais, 2.450 Km são rodovias estaduais e 110 Km são rodovias municipais. Das rodovias não pavimentadas, 3.270 Km são rodovias federais, 3760 Km são rodovias estaduais, 320 Km são rodovias estaduais transitórias e 23.560 Km são rodovias municipais.

Segundo o 2º Distrito Rodoviário Federal do Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (ANEXO I), o Estado do Pará tem duas rodovias federais pavimentadas, a BR-316, conhecida como a Rodovia Pará-Maranhão que corta o leste do Estado e a BR-010, conhecida como a Rodovia Belém-Brasília que corta o sudeste paraense.

Na FIGURA 1.1 é mostrado a localização das rodovias BR-316 e BR-010. Ambas as rodovias foram construídas com concreto betuminoso usinado a quente, cujo agregado graúdo é o seixo rolado, extraído de depósitos aluvionares,

abundantes no Estado, que após extração é submetido a tratamento de lavagem e peneiramento para separação das frações graúda e média.

Ainda segundo o 2º D.R.F./DNER (ANEXO I), a razão da escolha do seixo como agregado graúdo é a inexistência de ocorrências pétreas com volume suficiente para atendimento da demanda, pois atualmente uma única pedreira (gneiss) comercial é conhecida, localizada na Cidade de Bragança (região leste), distante 200 Km da capital Belém, com produção de volume pequeno.

“Ao longo dos anos a experiência tem comprovado a boa qualidade do CBUQ com seixo, confirmada na existência de segmentos que embora submetidos a pesado tráfego de caminhões e carretas, mantiveram as boas condições iniciais e somente foram recapeadas após 20 anos de uso” (2ºDRF/DNER, 1999).

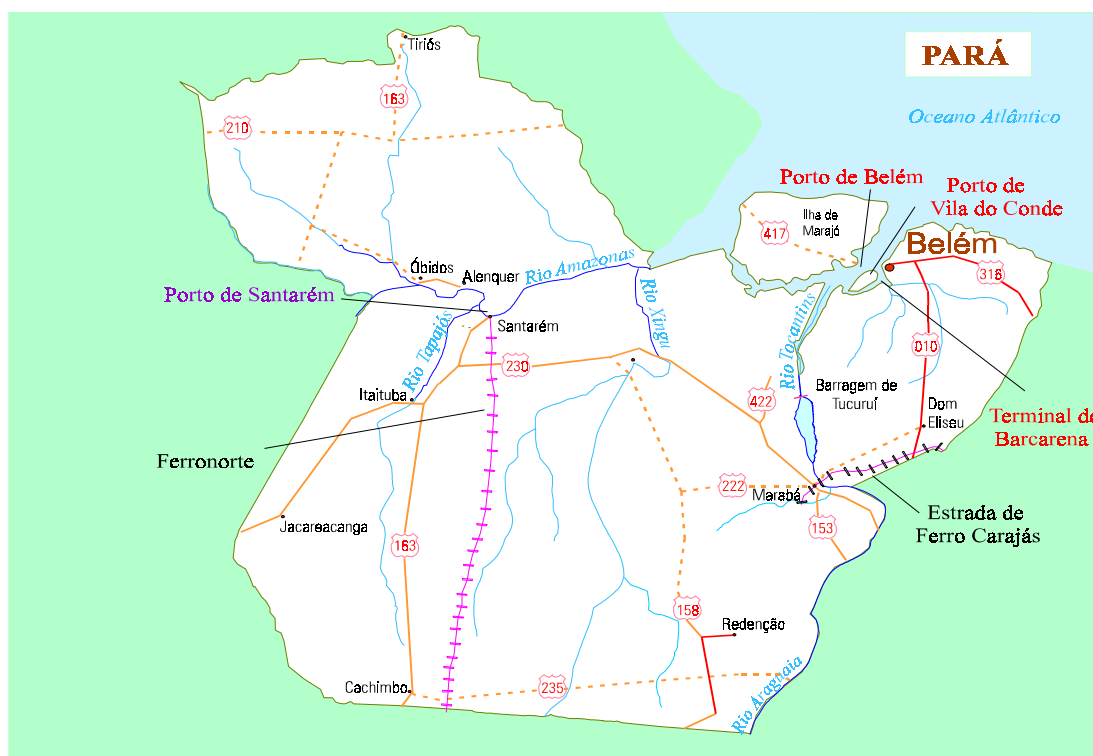


FIGURA 1.1 – Localização das rodovias BR-316 e BR-010, escala aprox. 1:13M (HOMEPAGE DO MINISTÉRIO DOS TRANSPORTES EM 27/03/2000)

### **1.1.2 – Justificativa para o uso de misturas betuminosas modificadas no Estado do Pará**

Segundo LU (1997), os asfaltos têm sido usados como revestimento nos pavimentos flexíveis há mais de 100 anos, entretanto, há duas décadas, as estruturas dessas rodovias feitas com asfalto convencional têm deteriorado mais rapidamente do que era esperado devido ao aumento do tráfego, das cargas por eixo e da pressão dos pneus e ainda devido a uma manutenção ineficiente. As degradações sofridas têm principalmente a forma de severas deformações permanentes e fissuras e a perda de materiais da superfície de rolamento dessas rodovias.

Ainda segundo o mesmo autor, muitos são os fatores envolvidos na *performance* e na durabilidade dos pavimentos asfálticos e um melhor desempenho dessas rodovias pode ser conseguido melhorando-se o projeto, com um uso adequado dos materiais e com métodos construtivos mais efetivos. O comportamento das misturas asfálticas em serviço depende de suas propriedades mecânicas e das intempéries a que estão submetidas e para que os pavimentos possam suportar a crescente solicitação do tráfego são necessários asfaltos de alta qualidade, sugerindo assim um grande potencial para os asfaltos modificados.

Os asfaltos modificados por polímeros são os ligantes obtidos pela incorporação de polímeros ao asfalto por meio de mistura mecânica ou por reação química e suas características físicas dependem do tipo de polímero, do tipo de asfalto, do teor de polímero usado e do processo de fabricação.

As intempéries alteram de modo significativo o revestimento betuminoso porque o cimento asfáltico de petróleo é sensível a variações climáticas. As baixas temperaturas facilitam o surgimento de trincas, enquanto que em climas quentes, como no caso do Brasil e em especial na região amazônica, onde a temperatura se mantém alta o ano inteiro, os pavimentos asfálticos estão sujeitos a maiores deformações permanentes devido ao amolecimento do CAP, o que contribui também para o envelhecimento precoce de nossas estradas.

Devido aos fatores citados, as misturas betuminosas modificadas com polímeros talvez sejam uma opção melhor em termos de durabilidade e conforto para nossas rodovias, pois segundo RAMOS et al (1996), os polímeros ajudam a manter as características elásticas do cimento asfáltico de petróleo até acima dos limites superiores de temperatura que o pavimento venha a atingir.

## **1.2 – OBJETIVOS DO TRABALHO**

O principal objetivo deste trabalho consiste em avaliar a vantagem ou desvantagem de utilizar-se asfalto modificado com polímero em misturas asfálticas densas do tipo concreto betuminoso usinado a quente com seixo rolado como agregado graúdo.

Para atingir o objetivo principal definiram-se os seguintes objetivos intermediários, que correspondem às várias fases deste estudo:

- a) Caracterização dos materiais constituintes das misturas betuminosas em estudo;
- b) Confecção dos corpos-de-prova Marshall;
- c) Execução dos ensaios avaliadores das propriedades mecânicas das misturas betuminosas em estudo;
- d) Análise dos resultados, conclusões e recomendações.

## **1.3 – AÇÕES DESENVOLVIDAS**

Para o estudo do comportamento mecânico de misturas asfálticas densas do tipo concreto betuminoso usinado a quente com asfalto convencional (CAP-40) e com asfalto modificado por polímeros SBS foram realizados estudos de caráter teórico e de desenvolvimento experimental.

Os estudos teóricos compreenderam os seguintes aspectos:

- a) Química e reologia do asfalto;
- b) Modificadores de asfalto;

- c) Propriedades do asfalto modificado;
- d) Experiências de campo com asfalto modificado;
- e) Degradações sofridas pelo pavimento flexível;
- f) Propriedades mecânicas das misturas betuminosas;
- g) Ensaio avaliadores das propriedades mecânicas das misturas betuminosas.

Os estudos de desenvolvimento experimental compreenderam os seguintes aspectos:

- a) Ensaio caracterizadores dos materiais;
- b) Dosagem pelo método da superfície específica;
- c) Ensaio Marshall;
- d) Ensaio de fluência por compressão uniaxial estática;
- e) Ensaio para determinação da resistência à tração por compressão diametral;
- f) Ensaio de módulo de resiliência por compressão diametral;

#### **1.4 - ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO**

O presente trabalho foi organizado em seis capítulos que, a seguir, são descritos sucintamente.

No presente capítulo, capítulo 1, fez-se um enquadramento temático e justificou-se a necessidade do estudo das misturas asfálticas densas com seixo como agregado e com asfalto convencional (CAP-40) e com asfalto modificado por polímero SBS.

O capítulo 2 contém a revisão bibliográfica referente ao asfalto, sua química e sua reologia, bem como os principais modificadores desses asfaltos e as propriedades do asfalto modificado, algumas experiências de campo com asfalto modificado e um resumo das principais degradações que um pavimento flexível pode apresentar.

No capítulo 3, faz-se uma revisão sobre as misturas betuminosas incluindo os materiais que as constituem, suas propriedades mecânicas e um resumo de alguns ensaios avaliadores dessas propriedades mecânicas.



No capítulo 4 apresenta-se o programa experimental propriamente dito, descrevendo-se a natureza e a procedência dos materiais utilizados nas misturas estudadas, bem como os métodos usados no que se refere aos ensaios feitos na tentativa de se avaliar as propriedades mecânicas das misturas.

No capítulo 5 são apresentados os resultados obtidos dos ensaios avaliadores das propriedades mecânicas para os dois tipos de misturas estudadas, estando esses resultados resumidos em gráficos. Contém também a análise desses resultados, com a interpretação.

No capítulo 6 são apresentadas as conclusões e recomendações de acordo com os resultados do estudo realizado.

## CAPÍTULO 2

### REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

---

#### 2.1 – INTRODUÇÃO

O asfalto é, sem dúvida, um dos materiais de construção mais antigos utilizados pelo homem, como mostra o quadro a seguir, segundo o THE ASPHALT INSTITUTE, 1947:

Pré-história	Esqueletos de animais pré-históricos estão preservados intactos na superfície de depósitos de asfalto, La Brea Pit, Los Angeles, California.
De 3200 a 540 A.C.	Escavações arqueológicas mostram o extenso uso do asfalto na Mesopotâmia e no Vale dos Indus, como cimento para alvenaria e rodovias e como impermeabilizantes para salas de banho e reservatórios d' água.
300 A.C.	O asfalto foi utilizado em larga escala em mumificações no Egito.
1802 D.C.	Foram usadas na França, rochas asfálticas em telhados, pontes e calçadas.
1838 D.C.	Foram importadas rochas asfálticas e usadas na Filadélfia, Estados Unidos, em construções de calçadas.
1876 D.C.	Foi feita a primeira pavimentação asfáltica em Washington

D.C., com asfalto importado de lagos.  
1902 D.C. Aproximadamente 20.000 toneladas de asfalto do petróleo foram refinados nos Estados Unidos.

Segundo o IBP (1994), a partir de 1909 iniciou-se o emprego de asfalto derivado de petróleo, o qual, pelas suas características de economia e pureza, em relação aos asfaltos naturais, constitui atualmente a principal fonte de suprimento.

“Inicialmente no Brasil, o asfalto utilizado era importado de Trinidad, somente a partir de 1944 é que começou-se a refinar petróleo pela Ipiranga Asfaltos S.A. “(DE SENÇO, 1997)

## **2.2 - ASFALTO**

### **2.2.1 – Materiais Betuminosos**

“Os materiais betuminosos utilizados em pavimentação classificam-se em dois tipos: alcatrões e asfaltos.

Os alcatrões para pavimentação (AP) resultam de processos de refino de alcatrões brutos, os quais originam-se da destilação dos carvões durante a fabricação de gás e coque. Estão em desuso no Brasil há mais de 25 anos.

Os asfaltos são materiais aglutinantes, de cor escura, constituídos por misturas complexas de hidrocarbonetos não voláteis de elevada massa molecular. Originam-se do petróleo, no qual estão dissolvidos e a partir do qual podem ser obtidos, seja pela evaporação natural de depósitos localizados na superfície terrestre (asfaltos naturais), seja por destilação em unidades industriais especialmente projetadas.

Os asfaltos naturais podem ocorrer em depressões da crosta terrestre, constituindo os lagos de asfaltos (Trinidad, Bermudas), ou aparecerem impregnando os poros de algumas rochas, formando as denominadas rochas asfálticas (gilsonitas). Encontram-

se também misturados com impurezas minerais (areias e argilas), em quantidades variáveis, sendo geralmente submetidos a processos de purificação para serem aplicados em pavimentação.

Atualmente, a maior parte do asfalto produzido e empregado no mundo é extraída do petróleo, do qual é obtido isento de impurezas, sendo quase completamente solúvel em bissulfeto de carbono ou tetracloreto de carbono” (IBP, 1994).

### **2.2.2 – Asfalto de Petróleo**

Segundo o IBP (1994), a quantidade de asfalto contida num petróleo é variável e depende de várias características, principalmente da densidade, podendo variar de 10 a 70%. Os processos de refinação do petróleo para obtenção de asfaltos dependem do tipo de petróleo e do rendimento em asfalto que ele apresenta. Se o rendimento em asfalto for alto e o cru apresentar características asfálticas, basta o estágio de destilação a vácuo. Para os petróleos que apresentam médio rendimento em asfalto e são do tipo intermediário, o processo é o da destilação em dois estágios: um a pressão atmosférica seguido de outro a vácuo. Se o petróleo é do tipo leve, além do esquema anteriormente citado, inclui-se um processo de extração após o segundo estágio de destilação.

Ainda segundo o mesmo instituto, desses processos o mais usado é o da destilação em duas etapas, pois produz o asfalto normalmente sem necessidade de instalações especiais e permite o uso de um maior número de tipos de petróleos e consiste, basicamente, de uma separação física dos vários constituintes do petróleo, pela diferença entre seus pontos de ebulição e de condensação, como é mostrado no esquema da FIGURA 2.1.

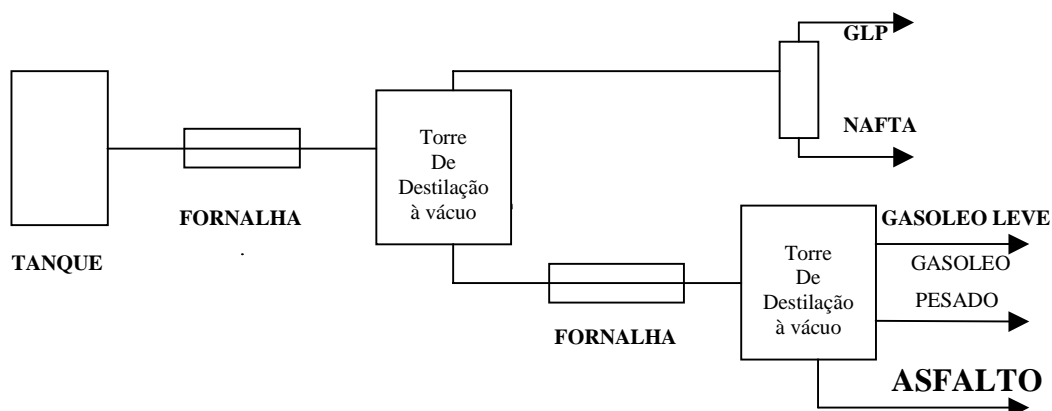


FIGURA 2.1 - Torre de fracionamento do petróleo (IBP, 1994)

“O produto obtido no fundo da torre de vácuo, após a remoção dos demais destilados de petróleo, é denominado resíduo asfáltico, e se for enquadrado nas Especificações Brasileiras passa a ter o nome de cimento asfáltico de petróleo – CAP, que à temperatura ambiente, é semi-sólido” (IBP, 1994).

Com o objetivo de estabelecer uma distinção entre os termos referentes ao asfalto e ao betume, a NBR 7208 de 1982 esclarece:

“Betume: Mistura de hidro-carbonetos de consistência sólida, líquida ou gasosa, de origem natural ou pirogênica, completamente solúvel em bissulfeto de carbono, freqüentemente acompanhado de seus derivados não-metálicos.

Ligante betuminoso: Produto à base de betume com acentuadas propriedades aglomerantes.

Asfalto: Material sólido ou semi-sólido, de cor entre preta e parda escura, que ocorre na natureza ou é obtido pela destilação do petróleo, que se funde gradualmente pelo calor e no qual os constituintes predominantes são os betumes.

Asfalto de petróleo: Asfalto obtido pela destilação de petróleo asfáltico.

Cimento asfáltico: Asfalto sólido ou semi-sólido de consistência adequada à pavimentação.”

Segundo o IBP (1994), a maior parte dos asfaltos fabricados (cerca de 90%) é utilizada em trabalhos de pavimentação, destinando-se uma pequena parte a aplicações industriais, como impermeabilizante, como isolante, etc. Os asfaltos de acordo com a sua aplicação, classificam-se em dois grupos, como mostra-se a seguir:

a) Asfaltos para pavimentação:

Cimentos asfálticos

Asfaltos Diluídos

Emulsões Asfálticas

Asfaltos Modificados

b) Asfaltos Industriais (para outras finalidades)

Asfaltos Oxidados

Os cimentos asfálticos são preparados especialmente para apresentar qualidades e consistências próprias para o uso direto na construção de revestimentos asfálticos. Os asfaltos diluídos resultam da diluição do cimento asfáltico por destilados de petróleo. As emulsões asfálticas são dispersões de cimento asfáltico em fase aquosa, com tempo de ruptura variável. Os asfaltos modificados com polímeros são obtidos a partir da dispersão do CAP com o polímero, em unidade apropriada, podendo ou não envolver reação química para sua estabilização. Os asfaltos oxidados ou soprados são asfaltos aquecidos e submetidos à ação de uma corrente de ar com o objetivo de modificar suas características normais, a fim de adaptá-los para aplicações especiais.

### **2.2.3 – Química do Asfalto**

Segundo o DNER (1998), quimicamente o asfalto é definido como um sistema coloidal constituído por micelas de asfaltenos dispersadas em um meio intermicelar oleoso, formado pela mistura de óleos aromáticos e saturados, chamados maltenos.

Os métodos de separação do asfalto em frações têm um ponto comum que é a separação da parte sólida do asfalto (os asfaltenos) pela adição de um solvente que dissolva os maltenos e não dissolva os asfaltenos. Utilizam-se de uma propriedade fundamental dos sistemas coloidais, que é a destruição de sua estabilidade pela eliminação da camada de proteção das micelas, que faz com que elas se associem e precipitem pela ação da gravidade.

A estabilidade de uma micela é dada por uma camada de agente peptizante ou por camadas de solvatação, bastando eliminar a proteção, que a micela sedimenta, tal procedimento é feito através da adição de um solvente que seja afim ao meio de dispersão e à camada de proteção, e que não tenha nenhuma afinidade pela micela.

As micelas são constituídas fundamentalmente por aromáticos, devido a sua alta relação C/H, sua separação se dá pela adição de um alcano leve. Uma vez separada a fase micelar (asfaltenos), a fase intermicelar (maltenos) fica solúvel no solvente usado, e pode então ser dividida em sub-grupos. Os sub-grupos são então separados por diferentes métodos, como são mostrados a seguir:

a) Método de Schweyer e Traxler:

Baseia-se no fracionamento por solvente, em duas etapas, na primeira, o malteno é separado do asfalto por solubilização em n-butanol, e na segunda, após a eliminação do butanol, o malteno é fracionado por acetona que após dissolver todo o óleo maltênico é resfriada, forçando a precipitação dos saturados, separando-os da fração solúvel, constituído pelos cíclicos (aromáticos e resinas). Este método separa o asfalto em três frações: asfaltenos, cíclicos (resinas e aromáticos) e saturados.

b) Método de Rostler e Sternberg:

Baseia-se na separação dos asfaltenos a partir da sua insolubilização em n-pentano e posterior separação das frações maltênicas por precipitação química, usando ácido

sulfúrico de densidades crescentes. Este método separa o asfalto em cinco frações: asfaltenos, bases nitrogenadas, acidafinas I, acidafinas II e saturados.

c) Técnica da Cromatografia:

Definida como o procedimento físico-químico que permite separar os componentes de uma mistura através de suas interações com duas fases distintas, sendo uma a fase estacionária ou adsorvente, e a outra a fase móvel ou solvente. Esta técnica levou ao surgimento do método da sílica-gel, também conhecido como método Rostler modificado, que baseia-se na separação dos asfaltenos pela solubilização dos maltenos em n-pentano, seguido da separação das frações maltênicas através de coluna cromatográfica, usando sílica-gel e argila Attapulgius como fase estacionária adsorvente, e como fase móvel, solventes de polaridade crescente. Este método separa o asfalto em quatro frações: asfaltenos, resinas ou compostos polares, compostos aromáticos e saturados.

d) Método de Colbert:

Baseia-se na separação dos asfaltenos pela solubilização dos maltenos em n-heptano, seguido pela separação dos maltenos em frações de polaridades crescentes, usando como adsorvente sólido a alumina finamente dividida. Este método separa o asfalto em quatro frações: asfaltenos, aromáticos polares, aromáticos naftênicos e saturados. Este método é o mais usado atualmente, entretanto existem outros métodos que utilizam equipamentos e tecnologias muito especializadas, como o SARA e a Ionização de Chama.

Ainda segundo o DNER (1998), a natureza, a forma e a quantidade das micelas, juntamente com a proporção relativa dos óleos aromático e saturado, comandam as propriedades coloidais e reológicas do asfalto. Quando as micelas e o óleo intermicelar têm grande afinidade, a solvatação das micelas é muito grande e o sistema apresenta tendência a formação de micelas livres, soltas, com espessa película entre elas. Nesse caso, o asfalto é bastante suscetível a ação da temperatura e



é chamado de CAP do tipo SOL. Em oposição, quando a afinidade micela-meio não é tão grande, a solvatação é deficiente, fazendo com que as micelas, pouco solvatadas, salientem sua assimetria, favorecendo a interligação entre elas, formando esqueletos que ocluem mecanicamente o óleo intermicelar restante; esses sistemas são muito menos sensíveis à ação da temperatura e são chamados de CAP do tipo GEL.

#### **2.2.4 – Reologia do Asfalto**

“Reologia é a ciência que estuda a deformação e fluxo dos materiais, seja nas formas líquido, liquefeito ou sólido em termos da elasticidade e da viscosidade do material. O asfalto é um material visco-elástico e pode exibir tanto um comportamento elástico como viscoso, ou uma combinação destes dois comportamentos, dependendo da temperatura e do tempo no qual o asfalto é observado.

Em temperaturas suficientemente baixas e/ou em altas taxas de carregamento (frequência), o asfalto reage essencialmente como um sólido elástico. Quando a temperatura aumenta e/ou quando a taxa de carregamento reduz, a propriedade viscosidade do asfalto se torna mais evidente. Em temperaturas suficientemente altas e/ou em longo tempo de aplicação de cargas, o asfalto é essencialmente um líquido Newtoniano e pode ser descrito por um valor de viscosidade independente da taxa de aplicação de carga.

As propriedades reológicas dos asfaltos podem influenciar significativamente na *performance* das misturas asfálticas durante a misturação, a compactação e em serviço. Por estas razões, vários tipos de testes reológicos são incluídos nas especificações dos asfaltos. As propriedades reológicas dos asfaltos são determinadas pelas interações moleculares (forças moleculares), que por sua vez dependem da composição química.

Em princípio, as propriedades reológicas desejadas para o asfalto podem ser conseguidas mudando a composição química do asfalto usando um aditivo ou uma modificação através de reação química. A adição de polímeros é um jeito versátil de

modificar a reologia dos asfaltos. Muitos tipos de polímeros são aproveitáveis, entretanto, não há um polímero universal e uma seleção deveria ser feita de acordo com as necessidades” (LU et al., 1999).

Segundo o DNER (1998), as propriedades reológicas de um CAP variam enormemente com a variação da temperatura, mas a forma dessa variação não é igual, já que ela varia de forma personalizada em cada CAP, por ser função de dependência direta da sua susceptibilidade térmica, que por sua vez, depende diretamente da constituição química e da forma como as micelas e o meio intermicelar se arrumam para atingir o equilíbrio coloidal estável.

Como fator altamente complicador, aparece ainda o envelhecimento do CAP ao longo de sua vida útil. É sabido que o envelhecimento se dá pela oxidação de moléculas polarizáveis dos maltenos, que se tornam polares, e passam a fazer parte da fração asfalteno. Com isso, ao longo da vida do CAP no pavimento, ele vai gradativamente aumentando a quantidade de asfaltenos e na mesma proporção, diminuindo a quantidade de maltenos. Isto leva o CAP a um endurecimento gradativo, já que o equilíbrio coloidal está permanentemente se deslocando no sentido do aumento das propriedades GEL, e em conseqüência, o CAP vai ficando com a susceptibilidade térmica cada vez menor. Isto significa que um CAP pode apresentar uma susceptibilidade térmica dentro da faixa desejada, e logo após a usinagem (quando ocorre o maior grau de envelhecimento do CAP), ir para a pista com esta susceptibilidade completamente fora da faixa desejada. Por essa razão, torna-se necessário um profundo conhecimento da susceptibilidade térmica do CAP, e principalmente, a forma como ela se altera durante o processo de usinagem e ao longo da sua vida útil.

#### **2.2.4.1 – Visco-elasticidade Linear**

“A análise da ação do tráfego de veículos sobre os pavimentos asfálticos é complexa, porque tem que levar em conta dois aspectos de fundamental importância:

- a) O carregamento devido ao tráfego pode ser de natureza dinâmica (ou de curta duração) e estática ( ou de longa duração).
- b) Devido à presença de material asfáltico, na composição do concreto asfáltico, este apresenta características termoplásticas, de modo que, a temperatura de serviço intervém diretamente na resposta mecânica desse material, diante da ação de cargas.

Assim, o tempo de duração de carga e a temperatura em que o pavimento se encontra são fatores que influem diretamente nas relações constitutivas das camadas asfálticas dos pavimentos” (COELHO& SÓRIA, 1995).

Por essa razão, segundo CHAMECKI<sup>1</sup> apud COELHO & SÓRIA (1995), os pavimentos asfálticos têm sido considerados como materiais de comportamento elasto-viscoplástico, sendo aceitável a aplicação da hipótese elástico-linear, quando o tempo de duração do carregamento for relativamente baixo e a temperatura de serviço do pavimento for relativamente baixa (inferior a 25°C), pois quando a temperatura de serviço do pavimento for relativamente alta, a parcela elástica das deformações torna-se desprezível, principalmente sob a ação de cargas estáticas ou de longa duração.

Segundo LU & ISACSSON (1997), o conceito de viscosidade foi usado primeiramente por Isaac Newton em “PRINCIPIA”, publicada em 1687, é sinônimo de atrito interno e é a medida da resistência ao fluxo. A força por unidade de área ( $\tau$ ) requerida para produzir movimento é proporcional ao gradiente de velocidade ( $dy/dt$ ). A constante de proporcionalidade  $\eta$  é chamada de coeficiente de viscosidade:

$$\tau = \eta x \frac{d\gamma}{dt} \quad (2.1)$$

---

<sup>1</sup> CHAMECKI, s. Síntese da reologia e da sua aplicação ao dimensionamento de pavimentos. Publicação B-10-59 do Curso de Especialização de Pavimentação Rodoviária. Rio de Janeiro-R.J., publicado pelo IPR-DNER, 1959. Reimpresso em 1961.

Um fluido é dito Newtoniano se a viscosidade não depende do gradiente de velocidade.

#### 2.2.4.1.1 - Modelos Básicos:

“Os modelos básicos usados na visco-elasticidade são a mola ou elemento de Hooke e o amortecedor ou elemento de Newton, que representam respectivamente as propriedades fundamentais da elasticidade e da viscosidade”(MONTEIRO, 1984). NA FIGURA 2.2 estão mostrados o elemento de Hooke e o elemento de Newton, onde  $\sigma$  é uma tensão normal aplicada.

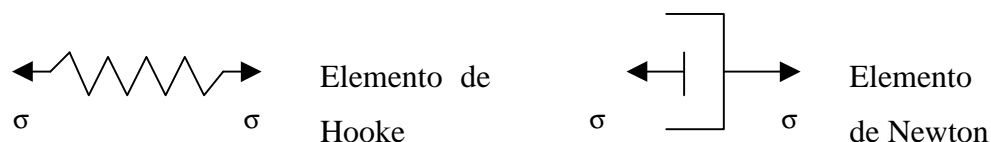


FIGURA 2.2 - Elemento de Hooke e elemento de Newton

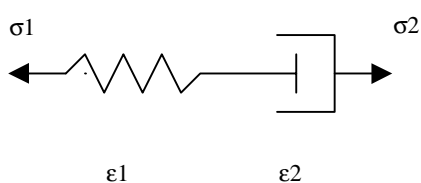
Segundo MONTEIRO (1984), mediante a associação destes elementos simples, em série ou em paralelo, são criados modelos mais complexos que procuram reproduzir a dependência da deformação em relação ao tempo que caracteriza o comportamento visco-elástico.

Ainda segundo o mesmo autor, a rigor, os modelos mecânicos representam os modelos matemáticos em que são enquadradas as idealizações de comportamento, fornecendo apenas uma descrição do comportamento fenomenológico, nada dizendo a respeito do mecanismo molecular ou estrutural da resposta visco-elástica, e como as leis da elasticidade e da viscosidade por simplicidade são lineares, os materiais resultantes de sua associação se encontram enquadrados na visco-elasticidade linear.

### 2.2.4.1.2 - Materiais Visco-elásticos simples:

Segundo MONTEIRO (1984), um elemento de Hooke e um elemento de Newton, associados em série constituem o líquido de Maxwell, criado para explicar a elasticidade dos líquidos. A associação em paralelo produz o sólido de Kelvin, criado para explicar o fenômeno do amortecimento das oscilações devido ao chamado atrito interno nos sólidos. Usados em novas associações para composição de modelos mais complexos são chamados de elemento de Maxwell e elemento de Kelvin. Cada um deles possui características que estarão presentes nos modelos mais complexos, tais como, fluência, relaxação, elasticidade imediata, elasticidade retardada, escoamento viscoso ilimitado, etc.

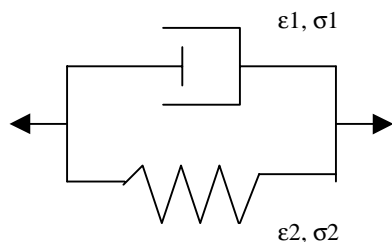
Na FIGURA 2.3 estão representados o líquido de Maxwell e o sólido de Kelvin. Em série implica admitir-se que a deformação do material ( $\epsilon$ ) é, a cada instante, a soma da deformação de duas parcelas, uma de natureza elástica e a outra viscosa. A associação em paralelo pressupõe que as deformações dos dois elementos sejam idênticas sendo a tensão ( $\sigma$ ) definida em duas partes, uma das quais é suportada pelo elemento elástico e a outra pelo elemento viscoso.



Líquido de Maxwell

$$\epsilon = \epsilon_1 + \epsilon_2 \quad (2.2)$$

$$\sigma = \sigma_1 = \sigma_2 \quad (2.3)$$



Sólido de Kelvin

$$\epsilon = \epsilon_1 = \epsilon_2 \quad (2.4)$$

$$\sigma = \sigma_1 + \sigma_2 \quad (2.5)$$

FIGURA 2.3 - Líquido de Maxwell e Sólido de Kelvin

O ensaio padrão para os dois modelos, consiste basicamente de duas etapas, uma chamada de fluência onde aplica-se instantaneamente uma carga constante e observa-se como ocorreu a deformação ( $0 < \text{tempo} \leq t_1$ ) e uma outra etapa chamada de recuperação onde é retirada a carga ( $\text{tempo} > t_1$ ) observando-se também o que acontece com a deformação. Na FIGURA 2.4 estão representadas as curvas de fluência e de recuperação do líquido de Maxwell e do sólido de Kelvin, onde  $\sigma$  é a tensão,  $\epsilon$  a deformação,  $E$  o módulo de elasticidade e  $F$  o coeficiente de viscosidade.

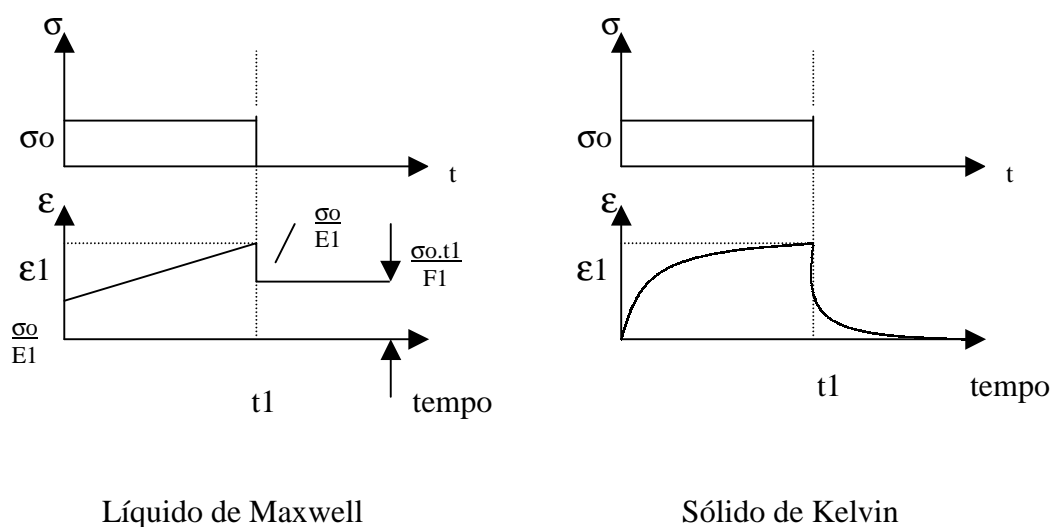


FIGURA 2.4 - Curvas de fluência e de recuperação do Líquido de Maxwell e do Sólido de Kelvin

#### 2.2.4.1.3 - Modelos Complexos:

Segundo GONTIJO (1980-a), as propriedades elásticas e viscosas de uma mistura betuminosa dependem da velocidade de aplicação da carga e da temperatura, e portanto, as variações de seu estado físico representam um fenômeno complexo que não pode ser expresso por uma função simples.

Ainda segundo o mesmo autor, o asfalto é considerado, muitas vezes, como sólido elástico, mas a longo prazo, seu comportamento é típico dos líquidos, como possui elasticidade dos dois tipos, a imediata e a retardada, torna-se necessário refinar o modelo que o represente melhor, introduzindo sucessivamente elementos que

expliquem as diversas características: resposta elástica; fluência; relaxação ou recuperação da fluência e elasticidade retardada.

O modelo reológico de Burger é aceito como um modelo que caracteriza satisfatoriamente os asfaltos, pois, contém os elementos elástico, viscoso e visco-elástico, como é mostrado na FIGURA 2.5 .

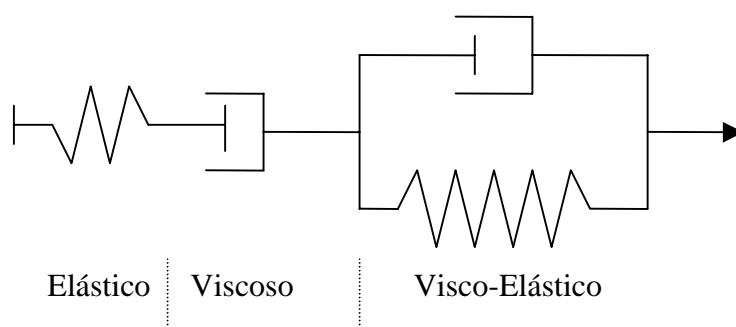


FIGURA 2.5 - Modelo Reológico de Burger.

Na FIGURA 2.6 é mostrado a curva de fluência e de recuperação do modelo reológico de Burger, onde  $\sigma$  é a tensão,  $\varepsilon$  a deformação,  $E$  o módulo de elasticidade e  $F$  o coeficiente de viscosidade.

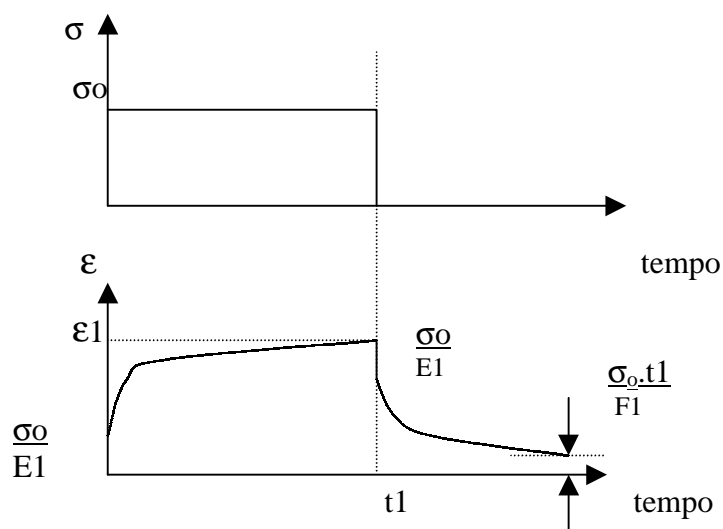


FIGURA 2.6 - Curva de fluência e de recuperação do modelo reológico de Burger.

GONTIJO (1980-a) afirma, que, mesmo que os modelos analógicos sejam bastante úteis para uma melhor compreensão do comportamento do material, sobretudo por separar claramente a parte da deformação devida à elasticidade instantânea, à elasticidade retardada e ao escoamento viscoso, pode-se dizer que eles não fornecem idéias sobre o comportamento macroscópico do material, não dando um esclarecimento sobre o espectro molecular do fenômeno visco-elástico, ou seja, do mecanismo interno das deformações do corpo real.

Segundo PERL et al (1983), em uma série repetida de ensaios de fluência por compressão uniaxial estática seguidos de ensaios de recuperação, ambos os testes com tempo de duração igual e temperatura constante em  $25 \pm 0,5^\circ\text{C}$ , em misturas betuminosas do tipo areia asfáltica, chegou à conclusão que a deformação total sofrida pelo corpo-de-prova pode ser separada em quatro componentes: deformação elástica, plástica, visco-elástica e visco-plástica. Em seus ensaios, essas quatro componentes foram analisadas em relação ao nível de tensão, ao tempo e ao número de ensaios, obtendo as seguintes conclusões:

- 1) A deformação elástica depende unicamente e de forma linear da tensão, independente do número de ensaios realizados repetidamente, sendo recuperável e independente do tempo;
- 2) A deformação plástica é linearmente proporcional à tensão e possui uma grande dependência com o número de ensaios realizados repetidamente, sendo não-recuperável e independente do tempo;
- 3) A deformação visco-elástica não é linearmente proporcional à tensão, dependendo fortemente do tempo, sendo recuperável;
- 4) A deformação visco-plástica não é linearmente proporcional à tensão, mas é fortemente ligada ao tempo e ao número de ensaios realizados repetidamente, sendo não-recuperável e dependente do tempo;



Desse modo, segundo COELHO & SÓRIA (1995), devido a separação em quatro componentes, dependendo das circunstâncias de solicitação, o modelo mais adequado para interpretar o comportamento mecânico dos concretos asfálticos, quando sujeitos à ação de cargas externas é o modelo viscoelástico ou então o modelo viscoplástico.

#### **2.2.4.1.4 - Visco-elasticidade de asfaltos modificados por polímeros:**

Segundo ROWE et al (1995), um asfalto modificado por polímero apresenta características diferentes em relação ao asfalto convencional, particularmente com relação à sua recuperação elástica a elevadas temperaturas, podendo este comportamento ser reproduzido usando-se um modelo reológico, como o de Burger, o qual contém elementos elástico, viscoso e visco-elástico. A deformação associada com o elemento visco-elástico, o elemento de Kelvin, é completamente recuperado em um tempo infinito, sendo que a introdução de polímeros nos materiais asfálticos, aumenta a proporção de deformação que é recuperável depois do carregamento (deformação elástica) e reduz a associada com o elemento viscoso (deformação plástica).

### **2.3 – MODIFICADORES DE ASFALTO**

#### **2.3.1 – Introdução**

“O asfalto tem sido usado na construção de pavimentos flexíveis há mais de um século. As diversas origens do petróleo cru e os diversos tipos de processos de refinamento do petróleo levam a uma extrema complexidade na composição química e na reologia do asfalto.

Devido ao grande número de asfaltos variando amplamente em polaridade e peso molecular nenhuma especificação da composição e da estrutura do asfalto é usada hoje. Além disso, o seu comportamento reológico é também muito complexo, variando de puramente viscoso até elástico, dependendo do tempo de carregamento e da temperatura.

Como material viscoelástico, o asfalto tem uma grande importância na determinação de muitos aspectos na *performance* de uma rodovia. Por exemplo, uma mistura betuminosa necessita ser flexível o suficiente em temperaturas de serviço baixas para prevenir as trincas térmicas no pavimento e ser também rígida o bastante em temperaturas de serviço altas para resistir à deformação permanente. Essas propriedades funcionais são necessárias para que o pavimento seja capaz de agüentar o crescimento dos carregamentos devido ao tráfego nas diversas variações climáticas. Infelizmente, as misturas betuminosas com asfalto convencional nem sempre tem tido uma *performance* desejável. Na tentativa de aperfeiçoar as propriedades dos asfaltos, alguns tipos de modificadores têm sido investigados. Dentre eles estão incluídos os aditivos, os polímeros e os reagentes químicos.

A utilização de asfaltos modificados por polímeros não é recente, mas o interesse por esta técnica cresceu consideravelmente durante a última década devido ao aumento na exigência de uma boa *performance* dos pavimentos asfálticos.

A despeito do grande número de produtos modificadores, existem apenas alguns tipos que são adequados como modificadores de asfalto. Os polímeros, quando usados como modificadores, são compatíveis com o asfalto, resistem à degradação em temperaturas comumente usadas nas misturas asfálticas e possuem preços acessíveis. O sucesso da modificação depende das características do asfalto usado, do tipo e quantidade de polímero, bem como do processo usado na preparação desses asfaltos modificados” (ISACSSON & LU, 1999).

### **2.3.2 - Principais Modificadores de Asfalto**

“As experiências misturando materiais betuminosos com polímeros com o objetivo de melhorar a *performance* desses asfaltos não é recente. Em 1823, T. Hancock, foi quem primeiro combinou asfalto de alcatrão com borracha natural, na fabricação de material impermeável para embarcações de madeira. Em 1844, E.E. Cassell misturou pela primeira vez, material betuminoso com borracha natural em construções rodoviárias. Em 1901, começaram as aplicações práticas dos asfaltos modificados

quando a *Société du Pavage en Asphalt Caoutchoute* foi criada na França. Em 1902, em Cannes, foi construída a primeira rodovia usando asfalto modificado. Todas as modificações nos asfaltos, antes da Segunda Guerra Mundial, foram feitas com borracha natural, devido ser o único material adequadamente avaliado até então. Os relatos quanto à *performance* da rodovia foram positivos e, com o desenvolvimento dos materiais sintéticos macromoleculares depois da Segunda Guerra Mundial, uma linha inteira de novos materiais com o potencial de serem usados como modificadores de asfalto foi avaliada.

A razão para combinar o asfalto com determinados polímeros é prevenir avarias prematuras no pavimento e desse modo aumentar a vida em serviço do pavimento. A função básica dos polímeros é reduzir a consistência e a susceptibilidade térmica do asfalto e por esse motivo aumentar sua resistência a deformação permanente em temperaturas altas de serviço enquanto impede fissuras em baixas temperaturas de serviço. O polímero também melhora o comportamento elástico do asfalto e assim ainda contribui para a sua resistência a deformação permanente e às trincas por fadiga. O polímero pode contribuir também para uma melhor adesão entre agregados e asfalto, diminuir a abrasão e melhora a resistência à oxidação” (ZANZOTTO & KENNEPOHL, 1996).

Segundo o DNER (1998), os polímeros pertencem a uma importante categoria de materiais de construção, usados desde tempos imemoriais: os materiais orgânicos. Os conceitos de macromoléculas e de polímeros são bastantes semelhantes. O termo polímero foi criado por Berzelius, em 1832, para designar compostos de pesos moleculares múltiplos, pois o termo isômero já era utilizado para designar compostos de mesmo peso molecular. Atualmente são considerados polímeros as moléculas relativamente grandes, em cuja estrutura se encontram repetidas unidades químicas simples.

O termo macromoléculas engloba os compostos de elevado peso molecular, considerando tanto os compostos que apresentam unidades químicas repetidas (polímeros), quanto os compostos de estruturas moleculares mais complexas. Os

polímeros são substâncias macromoleculares, que podem ser produzidas pela natureza (madeira, óleo lubrificante, cortiça, etc) ou podem ser obtidos artificialmente pela união sequenciada de moléculas pequenas, chamadas monômeros.

A variedade de polímeros produzidos pelo homem é muito grande, podendo-se inclusive, produzir diferentes produtos a partir do mesmo monômero, bastando para isso conduzir a reação em diferentes graus de polimerização.

Os polímeros são classificados de inúmeras maneiras, de acordo com a finalidade classificatória; as principais são:

- a) Quanto à ocorrência: naturais e sintéticos;
- b) Quanto à preparação: adição e copolímeros
- c) Quanto à cadeia: homogêneos e heterogêneos
- d) Quanto à estrutura: Lineares e tridimensionais
- e) Industrial: elastômeros, plásticos e fibras

A classificação mais citada e mais utilizada no meio rodoviário é a de Dismen, que classifica os polímeros em quatro grupos distintos:

- a) Termorrígidos: são aqueles que por ação do calor endurecem de forma irreversível. Voltando-se a aquecê-los, não amolecem mais; como exemplos: resina epóxi, poliuretano;
- b) Termoplásticos: são aqueles que por ação do calor amolecem de forma reversível, ou seja, amolecem quando aquecidos e endurecem quando resfriados. Como exemplos: E.VA., polietileno, polipropileno atático, policloreto de vinila, etc;

- c) Elastômeros: são aqueles que quando aquecidos se decompõem antes de amolecer, e apresentam propriedades elásticas que lembram a borracha. Como exemplos: SBR, BAN, etc;
- d) Elastômero-termoplástico: são aqueles que ao serem aquecidos se comportam como termoplásticos, mas em temperaturas mais baixas apresentam propriedades elásticas. Como exemplo: o SBS;

Dentre todos os produtos já avaliados como modificadores de asfaltos, optou-se nessa pesquisa enfatizar o estudo das borrachas, do etileno-acetato de vinila, mais conhecido pela sigla E.V.A. e do estireno-butadieno-estireno, conhecido pela sigla S.B.S., devido a estes produtos serem mais usados nas pesquisas Brasileiras.

### **2.3.2.1 - Borrachas**

Segundo ZANZOTTO & KENNEPOHL (1996), as experiências utilizando pedaços de borracha como modificadores de asfalto começaram em 1920, mas foi somente em 1960 que a mais recente e moderna tecnologia introduziu o processo de Charles McDonald. Desde então, foram desenvolvidos dois tipos de procedimentos, um processo seco e um processo úmido. A diferença entre eles é que no processo úmido a borracha é esfarelada e as partículas bem finas são adicionadas e misturadas ao asfalto, reagindo com ele. No processo seco são adicionados, grãos maiores de borracha diretamente à mistura betuminosa durante sua confecção, sendo que as partículas de borracha substituem parte dos agregados.

Na França, em 1963, segundo BRÜLÉ (1996), foram feitos trechos experimentais para a avaliação de asfaltos modificados, utilizando-se diferentes tipos de borrachas, tanto naturais como sintéticas. Entretanto, os resultados não foram considerados satisfatórios.

Segundo o INSTITUTO BRASILEIRO DO PETRÓLEO – I.B.P.(1996), a utilização de elastômeros vulcanizados, inclusive o pó de borracha proveniente da reciclagem

de pneumáticos como modificadores, apesar de mudarem significativamente as propriedades dos ligantes, gera misturas heterogêneas e a borracha age mais como um filler flexível, além de ser de difícil dispersão requerendo altas temperaturas e grande tempo de digestão.

CONSTANTINO et al (1998) entretanto, afirmam que o látex de estireno-butadieno, o SBR na forma de borracha moída de pneu, pode ser uma opção interessante na melhoria das propriedades reológicas do asfalto, com uma marcante redução no impacto ambiental como solução para o descarte de pneumáticos.

### **2.3.2.2 - E.V.A. – Etileno-acetato de vinila**

Segundo CONSTANTINO (1998), o etileno-acetato de vinila – E.V.A é conhecido como um termoplástico ou plastômero, pois escoar irreversivelmente quando aplicada uma tensão cisalhante, solubiliza-se nas frações saturadas do asfalto devido a sua natureza alifática e melhora as propriedades mecânicas do ligante, devido à existência de seqüências etilênicas de elevado peso molecular, modificando a reologia do material.

Segundo FREITAS (1996), trata-se de uma resina termoplástica produzida pela copolimerização do etileno (eteno) com acetato de vinila em elevada pressão de reação. As características finais da mistura asfalto/EVA dependem do teor e tipo de EVA empregado.

“Os copolímeros de Etileno-Acetato de Vinila – EVA como modificadores de ligantes, são muito utilizados em alguns países, destacando-se por exemplo, a França e Espanha” (FREITAS, 1996).

Segundo o INSTITUTO BRASILEIRO DE ASFALTO (1996), tem sido utilizado com sucesso sistema de asfalto/polímero com 5% de EVA na pavimentação rodoviária.

### 2.3.2.3 - S.B.S. – Estireno-butadieno-estireno

O SBS é um polímero industrial do tipo elastômero termoplástico. É uma borracha sintética de estireno-butadieno-estireno.

Segundo o DNER (1998), os domínios poliestirênicos se fundem acima dos 90°C e o domínio polibutadiênico só se torna rígido (vítreo) próximo a -90°C e afirma que por essa razão, o SBS é usado como modificador de CAP tanto nos locais onde as temperaturas são muito altas quanto nos locais onde as temperaturas são muito baixas.

Nos locais onde as temperaturas são muito altas, que ultrapassam em 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 fluído, 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 CAP-SBS passa a ter fluxo viscoso.

Nos locais onde as temperaturas são muito baixas, o CAP teria comportamento vítreo com trincamento correspondente. O SBS diminui bastante o ponto de ruptura Fraass da mistura, conferindo elasticidade até a temperaturas bem abaixo daquela correspondente à ruptura vítrea do CAP puro.

Com a elevação do ponto de amolecimento e, ao mesmo tempo, com a diminuição do ponto de ruptura Fraass do CAP, a presença do elastômero termoplástico SBS no CAP aumenta bastante o seu intervalo de plasticidade (PA-PF), o que significa uma considerável diminuição da sua susceptibilidade térmica, a qualidade mais procurada em aditivos para o CAP.

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 tanto com os componentes aromáticos e quanto com os não aromáticos.

Segundo VALKERING & VONK<sup>2</sup> apud CERATTI (1996), quando o polímero é disperso no asfalto a quente, os domínios de poliestireno dissolvem-se, assumindo 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 .

“Em pavimentos flexíveis, o ligante ideal deveria possuir propriedades constantes, ou seja, susceptibilidade térmica pequena em todas as variações climáticas a que estaria sujeito. Quando em temperaturas elevadas deveria tornar-se um fluído viscoso para que fossem possíveis a usinagem e a compactação das misturas betuminosas. Na realidade, entretanto, os asfaltos não reagem de uma maneira ideal mas, exibem uma contínua mudança de suas propriedades (viscosidade) em todas as temperaturas a que ficam sujeitos. Com a adição do polímero S.B.S., o ligante modificado pode apresentar-se, para certos intervalos de temperaturas, com as características de um ligante ideal” (LU & ISACSSON, 1997).

“Os copolímeros em bloco de estireno-butadieno-SBS são macromoléculas que combinam as propriedades termoplásticas e elastoméricas, sem necessidade de vulcanização e sua utilização, em larga escala nas últimas duas décadas, tem sido norteada de excelentes resultados pois este sistema polimérico apresenta recuperação elástica e resistência mecânica à tração, propriedades essenciais para que o revestimento asfáltico permaneça resistente e flexível em toda a gama de tensões e temperaturas a que está sujeito” (IBP, 1996).

Segundo PEREIRA et al (1998), em estudos na Universidade do Minho, em Portugal, foram testados dois tipos de misturas betuminosas densas, uma com asfalto

---

<sup>2</sup> VALKERING, C.P.; VONK, W.C (1991) Thermoplastic rubbers for the modification of bitumens: improved elastic recovery for high deformation resistance of asphalt mixes. 15<sup>th</sup> Australian R.R.B.C.



convencional e outra com asfalto modificado por polímero SBS visando aumentar a rigidez e a resistência a deformação permanente dos pavimentos flexíveis quando sujeitos a temperaturas elevadas no verão e bem como com o intuito de melhorar a resistência às trincas térmicas, desses pavimentos no inverno. Concluiu-se que o uso de asfalto modificado pelo polímero SBS foi mais expressivo em termos de melhora em relação a fadiga e que o tempo de serviço desses materiais pode chegar a 2,6 vezes em comparação com o asfalto convencional.

Conforme observou KHOSLA (1991), em estudos com o polímero *carbon black* e o estireno-butadieno-estireno – SBS, os efeitos dos modificadores nas propriedades das misturas asfálticas não é significativa a baixas temperaturas mas, relevantes em temperaturas altas. A *performance* desses polímeros indica que o *carbon black* é mais apropriado em reduzir deformações permanentes e que o SBS é melhor na redução de trincas por fadiga. O módulo de resiliência das misturas com os polímeros foram maiores em temperaturas altas sem afetar os valores de módulo em temperaturas baixas.

“Em nosso país, o uso de polímeros elastômeros termoplásticos tem como marco a pesquisa feita em 1988 pelo INSTITUTO DE PESQUISAS RODOVIÁRIAS DO DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM IPR/DNER, em escala de laboratório, ficando claro naquela ocasião a ótima *performance* de certos tipos de polímeros quando misturados com asfalto” (MARTINHO, 1994).

## **2.4 - ASFALTO MODIFICADO**

### **2.4.1 - Introdução**

“O mecanismo de trabalho do sistema coloidal CAP na camada de revestimento de um pavimento flexível, dá-se da seguinte maneira:

O CAP liquefeito envolve as partículas dos agregados, formando uma película, que ao se resfriar, após a compactação, volta a ter comportamento plástico. Quando o revestimento é solicitado, e sofre deflexão, há uma compressão do esqueleto mineral

que aumenta o atrito interno da camada, que reage à aplicação da carga. Na formação da bacia de deflexão, aparecem zonas onde o ligante asfáltico fica altamente tracionado, especialmente na fibras inferiores, e zonas onde o ligante é comprimido. Entretanto, o ligante é um sistema coloidal constituído de micelas sólidas dispersas num meio intermicelar líquido, que apesar da aparência de sistema sólido à baixas temperaturas, o CAP é um sistema solidificado com meio de dispersão no estado líquido. A forma de estruturação é que gera o aspecto sólido, mas o CAP só é um sistema sólido abaixo do ponto de ruptura Fraass, quando o meio intermicelar também solidifica. Dessa forma, tanto nas zonas de tração quanto nas zonas de compressão, o CAP sofre um fluxo plástico, havendo um escorregamento de micelas, umas em relação às outras.

Após a retirada da carga, ou a passagem da aplicação dela para o ponto seguinte, ocorre a distensão do esqueleto mineral comprimido, o que obriga a que o CAP sofra um fluxo plástico em sentido oposto ao sofrido no ato da aplicação da carga. E é claro que nesse fluxo plástico em sentido oposto, ocorre um escorregamento das micelas no sentido de sua posição original. Nesse fluxo plástico oposto, as micelas não retornam à sua posição original, havendo sempre uma deformação residual permanente, embora muito pequena, da ordem de  $10^{-8}$ m.

Na sucessão de aplicações dessas cargas, há um sucessivo deslocamento residual das micelas, enfraquecendo cada vez mais o ligante naquele ponto. Esse efeito é acumulativo e leva a que, após determinado número de aplicações de carga e seu correspondente deslocamento micelar residual, as fibras inferiores se tornem tão fracas que na próxima aplicação da carga elas se rompem. Com isso, há uma diminuição da resistência da camada à próxima aplicação da carga, o que gera uma deflexão maior que a anterior, causando o rompimento de novas fibras, já enfraquecidas, refletindo gradativamente essas trincas até a superfície.

O trincamento na face inferior da camada se dá exclusivamente no ligante asfáltico, assim como a reflexão dessas trincas até a superfície da camada.

À medida que as trincas aumentam, diminui a resistência da camada e aumenta bastante a deflexão, gerando novas trincas com maior rapidez até sua interligação, no chamado couro de crocodilo, que indica o término da vida do pavimento. A deformabilidade do pavimento e seu correspondente deslocamento residual não é sempre o mesmo; ele é função do tipo da CAP, de sua susceptibilidade térmica, e da temperatura em que está ocorrendo” (DNER, 1998).

Segundo MARTINHO (1994), o sistema modificado aumenta a probabilidade de retorno dessas micelas a sua posição original, acarretando uma maior vida útil do pavimento, devido ao fato de que o polímero envolve o CAP num sistema de molas e estas ao se esticarem oferecem maior resistência à deformação e quando cessado a ação das cargas o retorno das micelas à sua posição original é favorecido.

O polímero mais utilizado no Brasil é o SBS, produzido e patenteado no Brasil como por exemplo o usado nesta pesquisa o Betuflex B 65/60, da Ipiranga Asfaltos S.A.

Segundo MARTINHO (1994), os asfaltos modificados, em especial com o polímero SBS, quando em temperaturas altas, superiores ao seu ponto de fusão, comportam-se como plásticos podendo ser moldados e após sua fusão, quando de seu resfriamento são devolvidas suas propriedades elásticas.

LU & ISACSSON (1997), em estudos com asfaltos modificados por polímero SBS, observaram que o polímero SBS fez aumentar a elasticidade dos asfaltos em altas temperaturas e aprimorou a flexibilidade dos mesmos a baixas temperaturas. Concluíram deste modo, que essas melhorias nas propriedades do asfalto alertam para um aumento na resistência às deformações permanentes nas trilhas de roda e às trincas, nas altas e baixas temperaturas, respectivamente.

Segundo FREITAS (1996), os desempenhos dos produtos tradicionais e seus processos de aplicação em técnicas rodoviárias acham-se às vezes limitados. Para melhorá-los, um dos caminhos que estão sendo desenvolvidos é o de incorporar

polímeros, modificando assim, segundo a aplicação, uma ou mais das suas propriedades.

#### **2.4.2 - Propriedades**

Segundo FREITAS (1996), os polímeros modificam uma ou mais das seguintes propriedades:

- a) Susceptibilidade térmica, que caracteriza a variação da consistência, em função da temperatura. A incorporação de polímero tem geralmente por finalidade a redução dessa susceptibilidade, ampliando a faixa que separa a fragilidade a frio do amolecimento a quente.
- b) Coesão, que é definida como a energia necessária para romper uma película de ligante. Varia em função da temperatura, passando por um máximo. A finalidade da modificação com polímero é o aumento da coesão e/ou “faixa de coesão” conseguindo assim, uma consistência satisfatória em toda a faixa de temperatura de serviços.
- c) Elasticidade, que é caracterizada como a deformação causada sob efeito do tráfego e das variações de temperatura. A elasticidade é a aptidão para suportar essa deformação de modo reversível sem rompimento. A finalidade da incorporação de polímero é de acentuar a elasticidade e mantê-la na faixa mais ampla das temperaturas de utilização.
- d) Resistência à fadiga, que é a propriedade que os materiais têm de resistir quando solicitados de forma repetida entretanto, tendem a consumir progressivamente seu “capital” de resistência. A incorporação de polímero visa aumentar esse “capital” sobretudo à baixas temperaturas.

Segundo o mesmo autor, o SBS por ser termoplástico, permite que o ligante CAP-SBS possa fluir a altas temperaturas, em virtude da fusão dos domínios estirênicos, e

a temperaturas muito baixas, impede que o ligante se torne quebradiço em virtude da presença das molas butadiênicas. Na realidade, o que ocorre é que o polímero faz com que o CAP-SBS tenha uma susceptibilidade térmica mais baixa que a do ligante convencional. A presença do SBS na estrutura do CAP diminui as contrações nos efeitos negativos causados pela oxidação do CAP ou seja pela diminuição dos maltenos ao longo do tempo que produzem o processo de envelhecimento do CAP, levando o pavimento a perder a capacidade de deflectir, levando-o ao trincamento.

Segundo MOTTA et al (1993), o endurecimento do ligante asfáltico está associado a dois tipos de fenômenos: à perda de componentes voláteis durante o aquecimento na fase de construção, que seria um envelhecimento de curto tempo e à oxidação progressiva no campo principalmente na superfície exposta às intempéries e ao longo das trincas, que ocorre a longo tempo.

Para TAYEBALI et al (1992), as características relevantes para que o cimento asfáltico seja aceito como material de pavimentação, são as suas propriedades reológicas de adesão e de durabilidade e, a presença de modificadores nos cimentos asfálticos pode alterar seus comportamentos visco-elásticos. Para os propósitos de engenharia, os cimentos asfálticos podem ser considerados como um material com visco-elasticidade linear.

Segundo PRADHAN & ARMIJO (1993), o Departamento de Transportes de Montana, nos Estados Unidos, juntamente com a Universidade Estadual de Montana, pesquisaram quatro amostras de asfalto de mesma penetração, de diferentes origens e processos de refinamento. Cada amostra foi modificada com seis diferentes tipos de modificadores, um polietileno – PE, dois tipos de estireno-butadieno-estireno – SBS, um *carbon black* – CB, um tipo de etileno-acetato de vinila – EVA e um látex de estireno-butadieno – SBR. Os agregados usados nas misturas foram o seixo britado (graúdo e miúdo) e areia fina natural. Os resultados mostraram que os modificadores reduziram a susceptibilidade térmica de todas as amostras de asfalto, entretanto não de forma igual, verificando-se na ocasião que o efeito dos modificadores nos asfaltos depende da origem desses asfaltos. Os modificadores SBS, CB, EVA e PE tiveram

bons resultados com as diferentes amostras de asfalto no sistema subjetivo de peso adotado na pesquisa, indicando que houve mudança nas propriedades físicas relacionadas a deformação permanente. Os polímeros SBS e EVA foram selecionados para uma pista experimental numa rodovia interestadual de Montana.

### 2.4.3 - Experiências em Campo

a) No Brasil:

Segundo o DNER (1998), os estudos de asfalto-polímero foram iniciados em 1968 com a utilização de látex SBR. Posteriormente foram executados estudos e trechos experimentais utilizando vários materiais, contudo, sem o monitoramento adequado:

1969 – trechos com látex, nas ruas internas da Petroflex;

1976 – trechos com látex, em Belford Roxo;

Década de 70 – Ponte Rio-Niterói, com asfalto-epoxi;

Via Dutra, com asfalto epoxi;

1982 – Ponte Rio-Niterói, lama asfáltica com SBR;

1983 – trecho na Rio-Petrópolis, com Petrolatex S-62;

trecho na RJ-104, com látex;

pista externa da Praia de Copacabana;

1984 – Aeroporto Santos Dumont, com SBR, nas juntas de dilatação;

Aeroporto Internacional do Rio de Janeiro, com SBR, nas pistas auxiliares;

1988/1990 – estudo de asfalto modificado por polímero realizado pelo IPR;

1990 – trecho experimental com mistura densa e drenante na Rua Leopoldo Bulhões, com SBS e EVA, construído no estudo realizado pelo IPR;

1992 – trecho na Rodovia dos Bandeirantes, com SBS (Betuflex);

1993 – trecho na PE-75 (Pernambuco) com SBS;

trecho no Estado do Paraná, em corredores de ônibus;

1994 – trecho na PE-74 (Pernambuco) com SBS;

1995 – Autódromo de Interlagos, nas curvas de Fórmula I;

Autódromo de Jacarepaguá, com SBS, Fórmula I;

1996 – Autódromo de Jacarepaguá, com SBS, Fórmula Indy.

Segundo RAMOS (1996), em 1990, o IPR-DNER juntamente com o DEPARTAMENTO GERAL DE VIAS URBANAS da SECRETARIA DE OBRAS do município do Rio de Janeiro executaram pistas experimentais, em trechos selecionados na Rua Leopoldo Bulhões, com massas asfálticas densas e drenantes empregando ligantes convencionais e polimerizados (EVA e SBS). Ao longo de seis anos foram retirados, anualmente, corpos-de-prova e determinados os módulos de resiliência, sendo executados também análises deflectométricas e levantamentos visuais dos trechos. Verificou-se que o trecho construído com o polímero SBS permanecia com a superfície de rolamento em estado perfeito, sem trincas ou fissuras e a deflexão característica manteve seu valor; já os trechos construídos com asfalto convencional e modificado com EVA apresentavam trincas do tipo couro de crocodilo, buracos e deformações.

Segundo o mesmo autor, em 1996, quando da reforma do autódromo Nelson Piquet, na cidade do Rio de Janeiro, o revestimento asfáltico da pista, teve sua camada de rolamento feita com asfalto modificado por polímero SBS e a pintura de ligação entre a camada de regularização e a de rolamento foi executada com emulsão modificada com látex de SBS. Foram utilizados setenta e quatro toneladas de ligante modificado com polímero SBS e a pista em 1996, apresentava apenas alguns problemas de ondulações e ligeiros desníveis de juntas, devido a problemas de execução e não ao emprego do ligante modificado, não sendo verificado nenhum deslocamento de agregado.

b) No Exterior:

Segundo BRÛLÉ (1996), na França, em 1972, as autoridades notificaram as companhias de petróleo e as construtoras de seu interesse em asfaltos modificados e também a execução de pistas experimentais, para teste dos ligantes a serem desenvolvidos. Essa iniciativa governamental resultou numa larga pesquisa com vários tipos de asfaltos modificados.

Segundo SRIVASTAVA et al (1992), na cidade de Alkmaar, na Holanda, em uma seção de tráfego pesado as misturas betuminosas com asfalto convencional duravam cerca de seis a oito meses. Foi feito um teste com asfalto modificado com polímero estireno-butadieno-estireno – SBS e a *performance* desta seção após dez anos de serviço foi considerada mais que satisfatória pois não apresentava sinais de falhas, deformação permanente nas trilhas de rodas, corrugação, trincas ou fadiga.

Segundo ROGGE et al (1992), o Departamento de Transportes do Oregon – ODOT, fez experiências laboratoriais e de campo com misturas betuminosas usinadas a quente modificadas com polímeros, onde os polímeros usados foram o etileno-acetato de vinila – EVA, o estireno-butadieno – SB e o látex de estireno-butadieno – SBR. Foram construídas três trechos experimentais, descritas a seguir:

- a) A Rodovia Lava Butte com a Rodovia Fremont: As seções de controle com asfalto convencional e as seções com asfalto modificado com EVA foram construídas em 1985 e monitoradas regularmente. Em 1989, a *performance* da seção com asfalto modificado apresentou-se de forma inferior à da seção de controle, entretanto o ODOT chegou a conclusão de que o maior número de fissuras nesta seção deveu-se a um endurecimento excessivo do ligante modificado causado por um super-aquecimento durante a usinagem.
- b) A Rodovia Farewell Bend com a Rodovia N.Fork Jacobson Gulch: Este projeto foi construído durante o verão de 1988, com asfalto modificado com EVA e inspecionado nos verões de 1989 e de 1990, não sendo constatado nenhuma diferença significativa na *performance* das seções com e sem asfalto modificado. Não foram encontradas deformações permanentes e nem fissuras.
- c) A Rodovia Murphy Road com a Rodovia Lava Butte: Construída no verão de 1989, envolveu seções de testes com asfalto modificado com EVA, com SB e com SBR, além das seções de controle com ligante convencional. No inverno de



1990 foi verificado que as seções com polímeros apresentavam *performance* superior que a seção de controle.

Com estes trechos experimentais, o ODOT concluiu de que o uso de polímeros melhoram a susceptibilidade térmica dos asfaltos.

Segundo FLECKENSTEIN et al (1992), o Departamento Rodoviário de Kentucky em conjunto com o Centro de Transportes de Kentucky desenvolveram um programa experimental com o objetivo de avaliar a resistência à deformação permanente nas trilhas de roda das misturas betuminosas modificadas com polímero. O polímero usado foi o estireno-butadieno-estireno – SBS. No início de 1987 foram construídas as seções de teste e em agosto, outubro e novembro de 1987 e em abril de 1988, foram avaliadas as *performances* das seções e concluíram que as misturas com asfaltos modificados com polímeros são menos susceptíveis a fissuras à baixa temperatura e possuem maior resistência à deformação permanente nas trilhas de roda.

Segundo ZHOU et al (1994), o DEPARTAMENTO DE TRANSPORTE DO OREGON, nos Estados Unidos, em 1989, iniciou uma pesquisa para avaliar a *performance* em campo de três asfaltos modificados por polímero. Foram feitos cinco seções de teste com asfalto modificado por polímero e duas de controle com asfalto convencional e todas as seções foram avaliadas anualmente, sendo encontradas trincas transversais em todas as seções, com severidade variando de baixa a média. Não foi considerado que houvesse distinções claras de qual seção foi melhor, entretanto as pistas de controle tinham acentuadas perdas de agregados.

Segundo FARRAR et al (1993), o DEPARTAMENTO DE TRANSPORTES DO WYOMING – WTD, nos Estados Unidos, juntamente com o Heritage Group West Inc., fizeram um trabalho de pesquisa onde foi avaliada a *performance* de asfaltos modificados em misturas recicladas tanto em testes laboratoriais quanto em pistas experimentais na rodovia interestadual I-80, em Wyoming. Durante os anos de observação desta rodovia, a temperatura máxima foi de 35°C no verão e a

temperatura mínima foi de  $-38^{\circ}\text{C}$  no inverno. O estudo ocorreu entre os anos de 1987, quando foram feitas as nove seções de testes na I-80, e o ano de 1992. Das nove seções de testes, seis continham asfalto modificado em combinação com 60% de material virgem e 40% com material reciclado. As outras três seções foram feitas uma, com 60% de material virgem e 40% de material reciclado, outra com 50% de material virgem e 50% com material reciclado e a última seção com 100% de mistura virgem, estas três últimas seções foram feitas com asfalto convencional e foram usadas como seções de controle. Os modificadores de asfalto usados foram o estireno-butadieno-estireno - SBS, o *carbon black*- CB, o látex de estireno-butadieno - SBR, a fibra de polipropileno e o etileno-acetato de vinila – EVA. Concluiu-se que os asfaltos modificados não melhoraram de modo significativo a *performance* em campo das misturas quando comparadas às seções de controle.

Segundo PONNIAH et al (1996), em Ontario, no Canadá no ano de 1990 foi construída uma pista experimental onde foram comparadas as *performances* em campo de diferentes tipos de asfaltos modificados, com a do asfalto convencional, em seções de controle. Os trechos foram monitorados anualmente e verificou-se que os asfaltos modificados eram melhores com relação a resistência à deformação permanente e à fadiga.

Segundo KHATTAK & BALADI (1998), o DEPARTAMENTO DE TRANSPORTES DO MICHIGAN, desenvolveu um grande programa de pesquisa para avaliar os efeitos da modificação de asfaltos por polímeros, nas propriedades das misturas asfálticas, medidas em três temperaturas,  $25^{\circ}\text{C}$ ,  $60^{\circ}\text{C}$  e  $-5^{\circ}\text{C}$ . Foram pesquisados dois tipos de polímeros, o estireno-butadieno-estireno – SBS e o estireno-etileno-butileno-estireno – SEBS, e observou-se que para os dois polímeros, nas temperaturas de  $25^{\circ}\text{C}$  e  $60^{\circ}\text{C}$  a resistência à fadiga e a resistência à deformação permanente aumentavam. Observou-se também que o SEBS, a baixa temperatura, não melhorou a resistência às trincas e foi verificado que as propriedades plásticas das misturas melhoram à  $25^{\circ}\text{C}$ .

## **2.5 – PRINCIPAIS DEGRADAÇÕES SOFRIDAS PELO PAVIMENTO FLEXÍVEL**

### **2.5.1 – Introdução**

Um pavimento rodoviário flexível está sujeito a degradações ao longo do seu período de vida que reduzem a capacidade estrutural e a aptidão funcional para que foi projetado. Do ponto de vista estrutural, as fendas por fadiga das misturas betuminosas e as deformações permanentes são as principais degradações que contribuem para a redução da qualidade do pavimento.

### **2.5.2 - Deformação Permanente**

Segundo BALBO (1997), na terminologia brasileira de classificação de defeitos, o afundamento é considerado como sendo uma ocorrência de deformação permanente na superfície do pavimento. Dois casos são tratados de maneira distinta: quando não há ocorrência simultânea de elevação lateral ao afundamento, o afundamento é dito de consolidação. Até 6,0 m de comprimento são considerados locais; quando sua extensão é maior e ao longo das trilhas de roda, o afundamento é dito de consolidação da trilha. Quando ocorrem elevações, os afundamentos são ditos plásticos, sendo analogamente, até 6,0 m denominados locais ou, se em extensão maior e ao longo das trilhas de roda, afundamento plástico da trilha de roda.

As gêneses possíveis do afundamento local de consolidação:

- Deformação acentuada de camadas de solo e granulares inferiores com diminuição de volume;
- Início de um processo de solapamento motivado por ruptura de tubulações enterradas;
- Perda de resistência e ruptura de camadas inferiores motivada por saturação de materiais;

As gêneses possíveis do afundamento em trilha de consolidação:

- Camadas inferiores isoladamente ou conjuntamente sofrem processo de deformação permanente com alteração de volume, com eventual contribuição do revestimento asfáltico no processo.

As gêneses possíveis do afundamento plástico em trilhas de roda são:

- Fluência excessiva da mistura asfáltica do revestimento combinada à ação do tráfego e de temperaturas elevadas;
- Ação intensa do tráfego sobre mesmas posições em faixas estreitas com fluxo canalizado;
- Combinação de deformações plásticas de várias camadas do pavimento.

“As deformações permanentes causam principalmente desconforto e insegurança na circulação rodoviária. A solução para este fenômeno passa, na maior parte dos casos, pela escolha adequada da composição das misturas betuminosas, assim como pela correta escolha dos materiais granulares e dos sistemas de drenagem do pavimento” (PAIS,1999).

Segundo BOULDIN & COLLINS (1992) em temperaturas elevadas (60°C) as propriedades mecânicas do ligante tem uma influência significativa na resistência à deformação permanente em misturas betuminosas à quente e os asfaltos modificados-SBS tem maior resistência à deformação permanente comparado à dos asfaltos convencionais.

Segundo CORTÉ et al (1994), o tipo de asfalto interfere no melhoramento da resistência à deformação permanente de uma mistura asfáltica e o asfalto modificado com polímero SBS consegue melhorar a resistência à deformação permanente.

Na TABELA 2.1 são mostrados os principais fatores que influem nas deformações permanentes das misturas para concreto asfáltico.

TABELA 2.1 – Fatores que influem nas deformações permanente (D.P.) das misturas para concreto asfáltico (SOUZA et al<sup>3</sup> apud COELHO, 1994).

<b>FATOR</b>	<b>VARIAÇÃO DO FATOR</b>	<b>EFEITO DA VARIAÇÃO DO FATOR NA RESISTÊNCIA ÀS D.P.</b>
Textura Superficial	Lisa para Rugosa	Aumento
Granulometria	Aberta para Contínua	Aumento
Forma	Redonda para Angulosa	Aumento
Tamanho	Aumento do Tamanho Máximo	Aumento
Rigidez <sup>(a)</sup>	Aumento	Aumento
Quantidade de Ligante	Aumento	Redução
Volume de Vazios <sup>(b)</sup>	Aumento	Redução
Vazios dos Agregados Minerais	Aumento	Redução <sup>©</sup>
Método de Compactação	_(d)	_(d)
Temperatura	Aumento	Redução
Estado de Tensão/Deformação	Aumento da Pressão de Contato dos Pneus	Redução
Repetições do Carregamento	Aumento	Redução
Água	Seco para Molhado	Redução, se a mistura for sensível à água

<sup>3</sup> SOUZA, J.B.; CRAUSS, J.; MONISMITH, C.L. Summary report on permanent deformation in asphalt concrete. Publicação SHRP-A/IR-91-104 do Strategic Highway Research Program, 1991. 120p.

- (a) Refere-se à rigidez na temperatura em que a propensão às deformações permanentes está sendo determinada. A adição de produtos modificadores das características do ligante pode ser usada para aumentar a rigidez desse material nas temperaturas críticas, com uma conseqüente redução da sua propensão às deformações permanentes.
- (b) Quando o volume de vazios for inferior a 3% a propensão às deformações permanentes aumenta.
- (c) Questiona-se, atualmente, se valores de VAM muito baixos (p.ex., inferiores a 10%) devem ser evitados.
- (d) O método de compactação, tanto no campo como no laboratório, pode influir na estrutura do material e conseqüentemente na sua propensão às deformações permanentes.

Segundo SOUZA<sup>4</sup> et al apud SÁ & MOTTA (1996), uma das causas mais prováveis da deformação permanente em muitas misturas é o acúmulo de deformações cisalhantes permanentes na parte superior da camada de concreto asfáltico, sendo maior em áreas de elevado cisalhamento (próximas às bordas).

Segundo MOTTA & PINTO (1994), um dos principais mecanismos que determinam o fim da vida útil estrutural dos pavimentos é a deformação permanente que forma o afundamento de trilha de roda.

Para CERATTI et al (1996), as propriedades mecânicas dos ligantes modificados têm mostrado um grande potencial para evitar deformações permanentes das misturas, podendo-se indicá-las como causa da melhora no desempenho das misturas estudadas por sua equipe.

“O desempenho estrutural de um pavimento pode ser medido sob dois aspectos, relacionados aos defeitos resultantes das duas parcelas da deformação total: a deformação elástica ou resiliente e a deformação plástica ou permanente. A repetição

---

<sup>4</sup> SOUSA, J.B.; WEISSMAN, S.L.; SACKMAN, J.L.; MONISMITH, C.L.A. Non-linear elastic viscous with damage model to predict permanent deformation of asphalt concrete mixes. TRB Annual Meeting, 1993.

das cargas pelo tráfego leva ao surgimento das trincas de fadiga, associada à parcela elástica da deformação total, e aos afundamentos, especialmente nas trilhas de roda, associados à parcela elástica ou permanente.

O afundamento da trilha de roda é resultante do somatório das deformações permanentes que ocorrem a cada passagem de um veículo, sendo acumulativo, podendo-se ter dois tipos de afundamento da trilha de roda nos pavimentos com revestimentos de misturas asfálticas: um resultante da contribuição de todas as camadas e subleito, e outro resultante da deformação exclusiva (ou preponderante) da própria mistura asfáltica; então, além das condições de tráfego e ambientais, também as propriedades da própria mistura asfáltica são de suma importância no entendimento do fenômeno e conseqüentemente no controle de sua ocorrência. A revisão dos métodos de dosagem das misturas asfálticas, bem como a adição de modificadores aos ligantes asfálticos, são algumas tentativas para melhorar o desempenho dos revestimentos asfálticos” (MOTTA et al, 1996).

### **2.5.3 - Fadiga**

Segundo GONTIJO (1980-b), a fadiga é um processo de degradação estrutural, progressivo e localizado, que sofre um material submetido, em um ou em vários pontos, a tensões ou deformações repetidas, podendo culminar na fissuração ou ruptura completa do material após um suficiente número de repetições.

Para MOTTA & PINTO (1994), a fadiga representa o principal mecanismo de ruptura dos pavimentos asfálticos no Brasil, determinando o fim da vida útil estrutural do pavimento devido ao trincamento causado pela repetição das cargas e das conseqüentes deformações elásticas.

Segundo BALBO (1997), na terminologia brasileira de classificação de defeitos, fissuras e trincas são definidas dentro de um grupo geral de defeitos chamados fendas. Uma fissura é portanto uma fenda perceptível a olho nu a partir de distância

inferior a 1,5 m; trincas são as fendas maiores que as fissuras considerando o critério adotado para definir fissuras.

As trincas são classificadas como transversais (se aproximadamente perpendiculares ao eixo estradal) e longitudinais (se aproximadamente paralelas ao eixo estradal), sendo curtas quando a extensão for inferior a 1,0 m ou longas caso contrário.

Existem ainda as trincas ditas interligadas, que são divididas em duas categorias: trinca couro de jacaré (também designada vulgarmente por pele de crocodilo), com contornos erráticos, e trinca em bloco, com lados bem definidos aparentando blocos.

As gêneses possíveis para as trincas couro de jacaré:

- Processo de fadiga do revestimento asfáltico, prematuro ou não, que deve ser considerado no caso de extensas áreas afetadas; caso ocorra prematuramente, se não motivado por razões de natureza resiliente, emprego de asfalto oxidado na elaboração da mistura poderá ser causa a avaliar;
- Processo de ruptura multi-pontos no caso de associação com deformações plásticas localizadas, em geral motivadas por perda de resistência e/ou deformabilidade local excessiva do subleito e/ou outras camadas do pavimento;
- Reflexão acelerada de trincas de idênticas natureza pre-existentes em uma superfície asfáltica que recebeu o reforço.

“O aparecimento de fendas à superfície do pavimento, responsável pela progressiva degradação das camadas betuminosas do pavimento, é um fenômeno que deve ser retardado de modo a assegurar um bom funcionamento de toda a estrutura. As fendas permitem a entrada de água para as camadas granulares e solo de fundação, provocando uma diminuição da capacidade de suporte do pavimento, contribuindo ainda para o aumento do desconforto e redução da segurança durante a circulação. As fendas são ainda responsáveis pela concentração de tensões nas camadas do pavimento, acelerando a ruína de toda a estrutura” (PAIS,1999).



“No que diz respeito aos parâmetros que influenciam o valor das tensões e extensões que se desenvolvem nas camadas de um pavimento, em particular nas suas faces inferiores, são considerados como principais, os seguintes:

- as características do tráfego: carga por roda, pressão de contato, velocidade do veículo, intensidade do tráfego;
- as características próprias do pavimento: espessura e rigidez das camadas; e
- as condições climáticas, em particular, a temperatura.

A variação das tensões de tração que se desenvolvem na base de um revestimento betuminoso com os fatores citados acima, apesar de não ocorrer de forma sistemática, permite constatar que em geral a tensão de tração:

- diminui com o aumento da temperatura e conseqüentemente com o decréscimo do módulo de rigidez;
- diminui com o aumento do módulo da base (fenômeno da solidariedade);
- varia relativamente pouco com a espessura da camada de base (quando esta é superior a 20 cm) e com o módulo do solo de fundação por outra parte;
- diminui com o aumento da espessura do próprio revestimento e aumenta com o acréscimo do módulo de rigidez do concreto asfáltico” (GONTIJO, 1980-b).

Segundo SANGITA et al<sup>5</sup> apud CERATTI (1996), houve um aumento na vida de fadiga da ordem de 9 a 18 vezes para misturas com ligante modificado com 2 e 5% de SBS respectivamente, comparado com misturas convencionais. Aumentando o teor do modificador acima de 10%, obtiveram um decréscimo na vida de fadiga, indicando a existência de um teor ótimo, que seria função do tipo de betume base e do próprio modificador.

---

<sup>5</sup> SANGITA,P.K.;BOSE,S.;ARYA,I.R.Characterisation of polymer modified asphalt binders for roads and airfields.ASTM, Philadelphia, 1992.

## CAPÍTULO 3

# MISTURAS BETUMINOSAS –CONCRETO ASFÁLTICO CONVENCIONAL E MODIFICADO POR POLÍMERO

---

### 3.1 - INTRODUÇÃO

“Apesar das diversas crises petrolíferas no Brasil e no mundo, a preferência é por pavimentação com misturas betuminosas devido basicamente a cinco fatores: o preço competitivo, a impermeabilidade do ligante, a possibilidade de se trabalhar a diversas temperaturas, a durabilidade das misturas betuminosas e a adesividade do ligante aos agregados” (DE SENÇO, 1997).

“ O fator principal para se usar cimentos asfálticos modificados com polímero é elevar o nível de *performance* em campo dos pavimentos de concreto asfáltico. Para ter sucesso no mercado consumidor, a melhora na *performance* desses pavimentos deve compensar qualquer acréscimo nos custos associados a incorporação dos polímeros aos cimentos asfálticos do petróleo. As áreas críticas com relação a *performance* a longo prazo dos pavimentos flexíveis são:

- Rigidez e a relação rigidez x temperatura;
- Resistência à fadiga;
- Resistência à deformação permanente;
- Resistência às trincas térmicas a baixas temperaturas;

- Resistência característica;

Apesar de todas essas propriedades poderem ser apresentadas independentemente, é do conhecimento que elas estão todas interrelacionadas” (CARPENTER, 1987).

Segundo HIGGINS(1987), alguns dos fatores que afetam a qualidade e a durabilidade dos pavimentos são:

- Agregados de má qualidade;
- Granulometria ruim;
- Asfaltos de má qualidade;
- Subleitos pouco resistentes;
- Ação do clima;
- Volume de tráfego e carga dos veículos pesados;
- Altas temperaturas e oxidação;
- Variação diária da temperatura;
- Temperaturas baixas;
- Água e gelo;

### **3.2 - MATERIAIS**

Segundo o DNER-ES 313/97, o concreto betuminoso é a mistura executada em usina apropriada, com características específicas, composta de agregado mineral graduado, material de enchimento (filler) e ligante betuminoso, espalhada e comprimida a quente.

Segundo o DNER-ES 385/99, o concreto asfáltico com asfalto polímero, é a mistura executada em usina apropriada, com características específicas, constituída de agregado, material de enchimento (filler) se necessário, e cimento asfáltico de petróleo modificado por polímero do tipo S.B.S, espalhada e comprimida a quente.

### 3.2.1 - Agregados

Segundo o DNER-EM 37-97, agregado graúdo é o seixo rolado, o cascalho, a pedra britada, a escória de alto forno ou outros materiais granulares comprovadamente inertes e de características semelhantes, de diâmetro máximo superior a 4,8 mm.

Com relação ao agregado miúdo o DNER-EM 38-97, define como agregado miúdo a areia natural quartzosa, a areia artificial resultante da britagem de rochas estáveis ou, desde que aprovados, quaisquer outros materiais inertes com características semelhantes, de diâmetro igual ou inferior a 4,8 mm.

Para o concreto betuminoso usinado a quente - CBUQ e para o concreto asfáltico com asfalto polímero, o DNER-ES 313/97 e o DNER-ES 385/99 esclarecem, respectivamente, que o agregado graúdo pode ser pedra, escória, seixo rolado, ou outro material que seja indicado nas especificações complementares, devendo-se constituir de fragmentos sãos, duráveis, livres de torrões de argila e substâncias nocivas, entretanto diferem nas seguintes exigências mostradas na TABELA 3.1:

TABELA 3.1 – Exigências para o agregado graúdo (DNER-ES 313/97 / DNER-ES 385/99)

	Desgaste Los			
	Angeles	Índice de forma	Durabilidade	Adesividade
				Deve
Concreto betuminoso	*Igual ou inferior a 40%	Superior a 0,5	Perda inferior a 12%	apresentar boa adesividade
Concreto asfáltico com asfalto polímero	*Igual ou inferior a 55%	Superior a 0,5	Perda inferior a 12%	Sem exigências

\* Admitindo-se agregados com valores maiores, no caso de terem apresentado desempenho satisfatório em utilização anterior.

Com relação ao agregado miúdo tanto o DNER-ES 313/97 quanto o DNER-ES 385/99, esclarecem que o agregado miúdo pode ser areia, pó-de-pedra ou mistura de ambos. Suas partículas individuais devem ser resistentes, apresentar moderada angulosidade, estando livres de torrões de argila e de substâncias nocivas, devendo apresentar equivalente de areia igual ou superior a 55%.

De acordo com o DNER-ES 313/97 para concretos betuminosos usinados a quente e o DNER-ES 385/99 para os concretos asfálticos com asfalto polímero, a composição da mistura é feita de acordo como é mostrada na TABELA 3.2.

TABELA 3.2 – Composição da mistura (DNER-ES 313/97/ DNER-ES 385/99)

PENEIRA DE MALHA QUADRADA		% PASSANDO, EM PESO DAS FAIXAS			
DISCRIMINAÇÃO	ABERTURA mm	A	B	C	TOLERÂNCIAS
					FIXAS DE PROJETO (%)
2"	50,8	100	-	-	-
1 1/2"	38,1	95-100	100	-	±7
1"	25,4	75-100	95-100	-	±7
3/4"	19,1	60-90	80-100	100	±7
1/2"	12,7	-	-	85-100	±7
3/8"	9,5	35-65	45-80	75-100	±7
Nº 4	4,8	25-50	28-60	50-85	±5
Nº 10	2,0	20-40	20-45	30-75	±5
Nº 40	0,42	10-30	10-32	15-40	±5
Nº 80	0,18	5-20	8-20	8-30	±3
Nº 200	0,075	1-8	3-8	5-10	±2
Betume solúvel CS <sub>2</sub> (+) % (DNER-ES 313/97)		4,0-7,0 (ligação)	4,5-7,5 (lig.e rol.)	4,5-9,0 (rolamento)	±0,3
Ligante polimerizado solúvel no tricloroetileno, % (DNER-ES 385/99)		4,0-6,0 (ligação)	4,0-7,0 (lig.e rol.)	5,0-7,5 (rolamento)	±0,3

Segundo o IBP (1994), os agregados, com exceção do material de enchimento (filler), devem ser aquecidos à temperatura de 10 a 15°C acima da temperatura do cimento asfáltico. A mistura, entretanto, não pode ter temperaturas inferiores a 107°C e nem superiores a 177°C.

### 3.2.2 – Material de Enchimento (filler)

Material de enchimento (filler) segundo o DNER-EM 367-97, é o material mineral inerte em relação aos demais componentes da mistura, não plástico, do qual passam, pelo menos, 65% na peneira de 0,075 mm de abertura de malha, devendo ser homogêneo, seco e livre de grumos provenientes de agregações de partículas finas. O material de enchimento poderá ser cimento Portland, pó calcário ou cal hidratada, desde que estejam de acordo com as seguintes condições:

- De granulometria, mostrada na TABELA 3.3:

TABELA 3.3 – Granulometria do filler (DNER-EM 367/97)

Abertura de malha (mm)	% em peso, passando
0,42	100
0,18	95-100
0,075	65-100

- a) Cimento Portland comum ou cimento Portland de alto forno deverá atender à Especificação DNER-EM 036-95 e apresentar expansibilidade em autoclave de, no máximo, 0,8%.
- b) Pó calcário deverá conter, no mínimo, 70% de carbonatos, termos de carbonato de cálcio.
- c) Cal hidratada deverá obedecer às exigência de análise química e estabilidade da Especificação NBR 6473/96, da ABNT.

“A proporção de finos é a responsável pela distribuição espacial dos granulares de maior tamanho nos concretos asfálticos. Havendo grande proporção de finos, os grãos graúdos permanecem flutuando entre os finos na massa de concreto asfáltico. O contato grão a grão pode não existir. O concreto asfáltico com esta composição, além de ter sua resistência mecânica comprometida, expõe maior quantidade de granulares finos, apresentando superfície menos rugosa.

Por outro lado, as misturas em que a proporção de grãos finos é pequena, a superfície será formada somente pelos grãos graúdos. Nesta situação o contato inter-grãos ocorre entre os grãos de maior dimensão. A superfície será rugosa, formada pela distribuição espacial dos granulares graúdos” (MOMM, 1998).

Segundo AL-SUHAIBANI et al (1992), o filler entra nas misturas asfálticas com a “responsabilidade” de melhorar a estabilidade e a resistência das mesmas, devido a duas teorias. A primeira teoria é de que suas partículas finas, preenchendo os vazios existentes entre os agregados, aumentam a densidade e a resistência da mistura quando compactada. A outra teoria é que as partículas finas do filler, ficando em suspensão no ligante asfáltico e absorvendo os componentes asfálticos (mastic), aumentam assim a viscosidade do ligante e conseqüentemente a rigidez da mistura, sendo que essas duas situações ocorrem simultaneamente.

Ainda segundo o mesmo autor, em pesquisa realizada na Arábia Saudita, com três diferentes materiais de enchimento, pó de calcário, cal hidratada e cimento Portland, sendo o pó de calcário substituído progressivamente por cal hidratada e por cimento Portland, em três diferentes teores (3%, 5,5% e 8%), chegou às seguintes conclusões:

- a) Os valores da porcentagem de vazios das misturas não foram afetados quando da substituição do pó de calcário pelo cimento Portland;
- b) A estabilidade Hveem não sofreu alteração com a mudança dos tipos de material de enchimento usados nas misturas;

- c) A substituição do pó de calcário por cal hidratada causou um considerável aumento no ponto de amolecimento do mastic, mas quando substituído por cimento Portland o efeito foi pequeno;
- d) Para teores altos de filler (5,5% e 8%), as misturas contendo cal hidratada substituindo o pó de calcário apresentaram teores ótimos de asfalto maiores, alta porcentagens de vazios e baixas densidades em relação a todas as misturas contendo cimento Portland. As diferenças no teor ótimo de asfalto, vazios e na densidade aumentam com o aumento do teor de filler;
- e) Os módulos de resiliência das misturas decrescem com o aumento da quantidade tanto da cal hidratada quanto do cimento Portland, quando substituíram parte da quantidade do pó de calcário;
- f) A deformação permanente cresce com a substituição crescente de pó de calcário por cal hidratada ou cimento Portland. Os mais altos valores de deformação permanente ocorrem com 8% de pó de calcário quando substituídos, em parte, por 3% de cal hidratada. Os valores mais baixos de deformação permanente ocorreram com 5,5% de pó de calcário;
- g) A substituição de pó de calcário por cal hidratada ou cimento Portland pode ser favorável para melhorar o módulo de resiliência, mas pode ser desfavorável para a deformação permanente;
- h) Diferentes tipos de materiais finos produzem variações nas características físicas e mecânicas dos concretos asfálticos.

### **3.2.3 – Aglutinantes**

O DNER-EM 204/95 define como cimento asfáltico preparado de petróleo como o asfalto obtido especialmente para apresentar as qualidades e consistências próprias



para o uso direto na construção de pavimentos, tendo uma penetração a 25°C entre 5 e 300, sob uma carga de 100 gramas, aplicada durante 5 segundos.

“Os cimentos asfálticos são preparados especialmente para apresentarem qualidades e consistência próprias para o uso direto na construção de revestimentos asfálticos. É um material ideal para aplicação em trabalhos de pavimentação, pois além de suas propriedades aglutinantes e impermeabilizantes, possui características de flexibilidade, durabilidade e alta resistência à ação da maioria dos ácidos, sais e álcalis.

Classificam-se de acordo com sua consistência medida pela viscosidade dinâmica ou absoluta, isto é, o tempo necessário ao escoamento de um volume determinado de asfalto através de um tubo capilar, com auxílio de vácuo, sob condições rigorosamente controladas de vácuo e temperatura, e também por penetração, ou seja, pela medida em décimos de milímetros, que uma agulha padronizada penetra em uma amostra nas condições de ensaio” (IBP, 1994).

De acordo com o Regulamento Técnico do Departamento Nacional de Combustíveis de 1992 - DNC 01/92, revisão 02, os cimentos asfálticos de petróleo são classificados nos seguintes tipos, mostrados na TABELA 3.4 :

TABELA 3.4 – Classificação dos cimentos asfálticos de petróleo (Regulamento técnico - DNC 01/92-Revisão 02)

Viscosidade	Penetração
CAP 7	CAP 30/45
CAP20	CAP 50/60
CAP40	CAP 85/100
	CAP 150/200

“Os asfaltos classificados por penetração são fabricados tão somente nas Refinarias de Salvador e Fortaleza” (IBP,1994)

Ainda segundo o mesmo Instituto, poderão ser utilizados para os concretos asfálticos os cimentos asfálticos de petróleo dos tipos CAP-20 e CAP-40, bem como CAP-30/45, CAP-50/60 e CAP-85/100, existindo as seguintes restrições quanto ao emprego do CAP:

- Os CAP não podem ser aquecidos acima de 177°C, sendo a temperatura ideal obtida pelo estudo da relação temperatura-viscosidade. Esta temperatura limite visa evitar o possível craqueamento térmico do ligante;
- Não se aplica em dias de chuva, em temperatura ambiente inferior a 10°C e em superfícies molhadas.

“Foi analisada a possibilidade de se adaptar as especificações SUPERPAVE às condições climáticas brasileiras e dos Países do MERCOSUL. Os resultados preliminares obtidos demonstraram que os CAP atualmente produzidos atendem ao clima brasileiro e latino-americano mas que em regiões mais quentes seria necessária a produção de CAPs mais consistentes para assegurar maior resistência a formação de trilhas de roda” (LEITE et al,1997).

Na TABELA 3.5, segundo o regulamento técnico DNC 01/92-Revisão 02, são mostradas as especificações para o cimento asfáltico de petróleo, classificação por viscosidade. Na TABELA 3.6, de acordo com o DNER-EM 396/99 são mostradas as características físicas aceitáveis para o cimento asfáltico modificado por polímero e na TABELA 3.7, de acordo com REIS & SANTO (1999), é mostrada a ficha técnica do Betuflex .

TABELA 3.5 – Especificação técnica para o CAP, classificação por viscosidade  
(Regulamento técnico-DNC 01/92-Revisão 02)

CARACTERÍSTICAS	UNID.	CAP-7	CAP-20	CAP-40	ABNT	ASTM
Viscosidade a 60°C	P	700 a 1500	2000 a 3500	4000 a 8000	MB-827	D2171
Viscosidade Saybolt						
Furol, a 135°C	S	100 mín.	120 mín.	170 mín.	MB-517	E102
Viscosidade Saybolt						D2170
Furol, a 177°C	s	15 a 60	30 a 150	40 a 150		D2161 (1)
ECA a 165° por 5h:						
Variação em massa	%	1,0 máx.	1,0 máx.	1,0 máx.	MB-425	D1757
Relação de						
Viscosidade		4,0 máx.	4,0 máx.	4,0 máx.	(2)	
Ductilidade a 25°C	cm	50 mín.	20 mín.	10 mín.	MB-167	D113
Índice de						
susceptibilidade		(-1,5) a (+1)	(-1,5) a (+1)	(-1,5) a (+1)	(3)	
térmica						
Penetração (100g, 5s,						
25°C)	0,1mm	90 mín.	50 mín.	30 mín.	MB-107	D5
Ponto de fulgor	°C	220 mín.	235 mín.	235 mín.	MB-50	D92
Solubilidade em						
tricloroetileno	% massa	99,5 mín.	99,5 mín.	99,5 mín.	MB-166	D2042

O produto não deve produzir espuma quando aquecido a 175°C.

(1) Permitida sua determinação pelo método ASTM D2170 e sua posterior conversão pelo método ASTM D 2161.

(2) Relação de Viscosidade =  $\frac{\text{VISC. a } 60^{\circ}\text{C (poise) depois ECA}}{\text{VISC. a } 60^{\circ}\text{C (poise) antes ECA}}$

(3) Índice de susceptibilidade =  $\frac{(500)(\text{LOG PEN}) + (20)(t^{\circ}\text{C}) - 1951}{120 - (50)(\text{LOG PEN}) + (t^{\circ}\text{C})}$

onde (t°C) = Ponto de amolecimento, MB-164.

TABELA 3.6 – Especificação técnica para o cimento asfáltico modificado por polímero (DNER-EM 396/99)

CARACTERÍSTICAS	EXIGÊNCIA	
	Mínima	Máxima
Penetração, 100g, 5s, 25°C, 0,1mm	45	-
Ponto de fulgor, °C	235	-
Ductilidade, 25°C, 5cm/min, cm	100	-
Densidade relativa, 25°C/25°C	1,00	1,05
Ponto de amolecimento, °C	60	85
Ponto de Ruptura Fraass, °C	-	-13
Recuperação elástica, 20 cm, 25°C, %	85	-
Viscosidade cinemática, 135°C, Cst	850	-
Viscosidade cinemática, 115°C, Cst	350	-
Estabilidade ao armazenamento: 500ml em estufa a 163°C, 5 dias:		
- diferença de ponto de amolecimento, °C	-	4
- diferença de recuperação elástica, 20 cm, 25°C, %	-	3
Índice de susceptibilidade térmica (IST x 10 <sup>2</sup> )	2	5
Efeito do calor e do ar:		
- variação de massa, %	-	1,0
- percentagem da penetração original	50	-
- variação do ponto de amolecimento, °C	-	4
- recuperação elástica, %	80	-

Nota 1 – O índice de susceptibilidade térmica (IST), deve ser determinado a partir da inclinação da reta penetração x temperatura, para temperaturas de 15°C, 20°C, 25°C, 30°C e 35°C. A inclinação da reta é determinada pelo ajuste da equação  $\log(\text{pen}) - C + AT$ , aos pontos dos ensaios, onde:

Log (pen) – logaritmo da penetração.

A – inclinação da reta.

C – constante.

T – TEMPERATURA, °c.

Nota 2 – O produto não deve produzir espuma quando aquecido a 175°C.

TABELA 3.7 – Ficha técnica do Betuflex (REIS &amp; SANTO, 1999)

CARACTERÍSTICAS	BETUFLEX	BETUFLEX	BETUFLEX
	B 60/60	B 65/60	B 80/60
Viscosidade a 135°C, cps, máx.	2500	2500	2500
Viscosidade a 145°C, cps, máx.	2000	2000	2000
Viscosidade a 175°C, cps, máx.	450	450	450
Penetração a 25°C (100g,5s),dmm	50-70	50-70	50-70
Ponto de Amolecimento, °C	55-65	60-75	75-90
Ponto de ruptura Fraas,°C,mín.	-10	-15	-15
Intervalo de Plasticidade,°C,mín.	65	75	90
Índice de Suscetibilidade Térmica, mín.	zero	+1	+3
Densidade a 20/4°C	1,00-1,04	1,00-1,04	1,00-1,04
Ponto de Fulgor, °C, mín.	240	240	240
Ductilidade a 25°C, cm, mín.	100	100	100
Ductilidade a 10°C, cm, mín.	90	90	90
Recuperação Elástica a 25°C, %, mín.	60	85	85
Recuperação Elástica a 10°C, %, mín.	50	70	70
Compatibilidade a 163°C, 2 dias, máx.	2	2	2
Micromorfologia da dispersão	OK	OK	OK

Para o IBP (1994), as mais importantes funções exercidas pelo asfalto no pavimento são as aglutinadora e impermeabilizadora. Como aglutinante, proporciona uma íntima ligação entre agregados, capaz de resistir à ação mecânica de desagregação produzida pelas cargas dos veículos. Como impermeabilizante, garante ao revestimento vedação eficaz contra a penetração da água.

Segundo o IBP (1996), o asfalto modificado melhora quatro propriedades fundamentais dos ligantes asfálticos que são: a termo-suscetibilidade, a resistência coesiva, o comportamento reológico e a adesão. O asfalto modificado permanece com a consistência inalterada sob uma larga faixa de temperaturas, pois há o incremento do ponto de amolecimento e da viscosidade.

### 3.2.4 – Melhorador de Adesividade

O DNER-ME 079-94 define adesividade de agregado a material betuminoso como a propriedade que tem o agregado de ser aderido por material betuminoso, sendo avaliada pelo não deslocamento da película betuminosa que recobre o agregado, quando a mistura agregado-ligante é submetida à ação de água destilada fervente e a soluções de diferentes concentrações molares de carbonato de sódio ferventes.

O DNER-ME 078-94 refere-se à adesividade de agregado graúdo a ligante betuminoso, que é avaliada pelo não deslocamento da película betuminosa que recobre o agregado, quando a mistura agregado-ligante é submetida, a 40°C, à ação de água destilada, durante 72 horas.

Segundo VINHA (1975), as características físicas da superfície (textura, porosidade, impurezas) e a estruturas cristalina e química do agregado são de fundamental importância no que se refere à adesividade ao ligante betuminoso.

Quanto às características físicas da superfície, as influências são:

- Da textura: quanto mais irregular for a superfície, maior será a área de contato e, portanto, maior a adesividade;
- Da porosidade: havendo porosidade, haverá adsorção de tipo físico em relação ao ligante betuminoso, devido a forças capilares, maior portanto será a adesividade;
- Das impurezas: a presença de finos ou água na superfície e nos poros dos agregados é altamente prejudicial à adesividade. Aumenta a tensão superficial, o que dificulta a perfeita molhagem da superfície do agregado pelos asfaltos;

Quanto às estruturas cristalina e química:

Os minerais têm seus átomos dispostos em uma rede cristalina, cujos átomos da superfície têm forças não aplicadas, que podem exercer atração sobre átomos de gases, líquidos ou sólidos que com ela entrem em contato íntimo, mantendo uma camada monomolecular dessas substâncias fortemente aderidas, chamada de adsorção química. Esse tipo de adsorção é o principal fator nas relações de adesividade entre o agregado e os ligantes betuminosos.

A composição química dos minerais varia muito, podendo conter grande número de elementos, numa variação de proporção e em um número de arranjos quase infinitos, podendo-se prever portanto, a variedade dessas forças livres existentes na superfície dos agregados e como conseqüência destes fatores, verifica-se que os agregados ditos ácidos costumam apresentar má adesividade, enquanto que os básicos costumam apresentar melhor adesividade com o ligante betuminoso (Rochas ácidas:  $\text{SiO}_2 > 66\%$  - Intermediárias  $\text{SiO}_2 = 55\% - 66\%$  - Básicas:  $\text{SiO}_2 < 55\%$ ).

Segundo VINHA (1975), para obter-se uma adequada adesão do filme betuminoso sobre a superfície do agregado, deve-se tornar a energia livre superficial do ligante maior que a energia livre superficial do agregado. Deve-se considerar que o agregado será coberto por um material (asfalto), que irá modificar sua característica de superfície, onde predominam cargas elétricas de diversas origens para uma superfície sem cargas, ou seja, irá reduzir a energia superficial do agregado. Quanto mais reduzida se tornar a energia superficial do agregado melhor será a adesão.

Para uma adesão perfeita do filme asfáltico (apolar) com a superfície do agregado, é necessário dar ao asfalto condições de atender a demanda de energia da superfície do agregado. Coloca-se no asfalto uma substância altamente polar, capaz de dar a este uma carga elétrica superior a de qualquer agregado e até mesmo superior a da água, sem modificar suas propriedades. Um vez presente no asfalto, o melhorador de adesividade asfalto-agregado quebra as forças retráteis do ligante, facilitando a formação de um filme sobre a superfície do agregado.

Além do aditivo melhorador de adesividade que é adicionado ao asfalto, mudando suas características de adesividade em relação aos agregados, existem aditivos que são adicionados aos agregados, modificando suas características de superfície e, deste modo, melhorando a adesividade asfalto-agregado.

Segundo BERNUCCI et al (1999), tradicionalmente são utilizados três tipos de melhoradores de adesividade em misturas asfálticas: o cimento Portland; a cal hidratada e aditivos químicos.

Segundo AGLAN et al (1993), em estudos com o polímero SBS, com auxílio de um microscópio eletrônico, verificaram uma mudança gradual e significativa na morfologia da superfície fissurada da amostra, quando se aumentava o percentual de aditivo, concluindo que tal fato é indicativo de uma melhor adesão entre o ligante e o agregado e uma melhor coesão do ligante que, por sua vez, contribui para o aumento da rigidez dos concretos asfálticos.

### **3.3 - PROPRIEDADES MECÂNICAS**

As principais propriedades mecânicas exigidas para as misturas betuminosas segundo o HIGHWAY RESEARCH BOARD<sup>6</sup> (1955), apud COELHO (1992) são:

- Trabalhabilidade;
- Durabilidade;
- Estabilidade;
- Flexibilidade;
- Resistência por aderência superficial.;

A trabalhabilidade é referente às operações de mistura e espalhamento da massa, que devem ocorrer sem grandes dificuldades.

---

<sup>6</sup> HIGHWAY RESEARCH BOARD. Bituminous Paving Mixtures: Fundamentals for Design. Washington, D.C., E.U.A, HRB, Bulletin 105, 1955.45 p.



A durabilidade é caracterizada pela resistência das misturas às ações do tempo e do tráfego e, para que isso ocorra, é necessário o bom envolvimento das partículas granulares pelo asfalto devido a uma boa misturação, ao teor ótimo de ligante e a um baixo volume de vazios devido à compactação eficiente.

Estabilidade de uma mistura betuminosa é a capacidade de suportar os carregamentos oriundos do tráfego sem sofrer deformações permanentes e irreversíveis.

Flexibilidade é a propriedade da mistura asfáltica de resistir, sem falhas, às flexões repetidas devido a passagem dos veículos (resistência à fadiga).

Os agregados utilizados na composição da mistura betuminosa são importantes na obtenção de camadas com textura e atrito superficial convenientes a oferecer resistência ao deslizamento dos pneus dos veículos, ou seja, resistência por aderência superficial.

### **3.4 - ENSAIOS AVALIADORES DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS**

Segundo SOUZA<sup>3</sup> et al (1991), apud COELHO (1994), os ensaios avaliadores dos parâmetros elásticos, viscoelásticos, plásticos e de resistência ao cisalhamento dos concretos asfálticos, são classificados em:

- Ensaios de compressão uniaxial com corpos-de-prova cilíndricos, não-confinados de carregamentos estáticos, repetidos ou dinâmicos;
- Ensaios de compressão triaxial com corpos-de-prova cilíndricos, confinados, com carregamentos estáticos, repetidos ou dinâmicos;
- Ensaios de compressão diametral realizados com corpos-de-prova cilíndricos, com carregamentos estáticos ou repetidos;
- Ensaios de trilha-de-rodas;

Segundo MOTTA & PINTO (1994), os ensaios mais utilizados no Brasil com relação às propriedades de fadiga são:

- Ensaio de compressão diametral dinâmico para a obtenção do módulo de resiliência (DNER ME 133/94);
- Ensaio de flexão alternada;
- Ensaio estático em prensa de adensamento convencional de solos;

### **3.5 – SELEÇÃO DOS MÉTODOS DE ENSAIO PARA A PRESENTE PESQUISA**

Com o objetivo de se avaliar a vantagem ou não de se utilizar asfalto modificado por polímero em misturas betuminosas com seixo rolado e lavado vindo da região amazônica fez-se uso dos seguintes ensaios:

- Ensaio Marshall;
- Ensaio de fluência por compressão uniaxial estática;
- Ensaio para determinação da resistência à tração por compressão diametral;
- Ensaio de módulo de resiliência sob compressão diametral em três diferentes temperaturas.

### **3.6 - ENSAIO MARSHALL**

Segundo DeSenço (1997), o Ensaio Marshall foi desenvolvido em 1930 pelo Departamento de Estradas de Rodagem do Estado do Mississippi nos EUA, tendo como objetivo determinar a quantidade ótima de ligante betuminoso a ser utilizado numa mistura betuminosa.

Ao longo dos anos foi modificado para adaptar-se à realidade do aumento da carga de roda e da pressão dos pneus dos veículos e dentre as modificações foram sugeridos novos critérios para a determinação da quantidade ótima de ligante que

deveria ser a mais próxima dos valores correspondentes à estabilidade e densidade aparente máximas, além dos outros parâmetros como porcentagem de vazios, relação betume/vazios, estabilidade e fluência terem tido seus valores modificados para a nova realidade.

No Brasil, atualmente, os parâmetros usados no Método Marshall para concreto betuminoso usinado a quente, têm que se enquadrar nos limites mostrados na TABELA 3.8 (DNER-ES 313/97). Os limites dos parâmetros usados pelo método Marshall para concreto asfáltico com asfalto polímero estão mostrados na TABELA 3.9 (DNER-ES 385/99).

TABELA 3.8 – Ensaio Marshall – valores limites (DNER-ES 313/97)

<b>DISCRIMINAÇÃO</b>	<b>CAMADA DE ROLAMENTO</b>	<b>CAMADA DE LIGAÇÃO(BINDER)</b>
Porcentagem de Vazios (%)	3 a 5	4 a 6
Relação Betume/Vazios (%)	75/82	65/72
Estabilidade, mínima (Kgf)	350 (75 golpes) 250 (50 golpes)	350 (75 golpes) 250 (50 golpes)
Fluência (mm)	2,0 – 4,5	2,0 – 4,5

TABELA 3.9 – Ensaio Marshall – valores limites (DNER-ES 385/99)

<b>CARACTERÍSTICAS</b>	<b>CAMADA DE ROLAMENTO</b>	<b>CAMADA DE LIGAÇÃO(BINDER)</b>
Porcentagem de Vazios (%)	3 a 5	4 a 6
Relação Betume/Vazios (%)	75 a 82	65 a 72
Estabilidade, mínima (Kgf)	500 (75 golpes)	500 (75 golpes)
Fluência (mm)	2,0 a 4,5	2,0 a 4,5
Resistência à tração por compressão diametral a 25°C (Kgf/cm <sup>2</sup> )	7,0 a 12,0	7,0 a 12,0

O ensaio Marshall, segundo a ABNT/NBR 12891 (1993), consiste basicamente em:

- a) Secagem, análise granulométrica e composição da mistura para os agregados;
- b) Estimativa da porcentagem ótima do ligante para o agregado a ser utilizado, seja por experiência anterior ou através da superfície específica (DER/SP – M 148) ou por outro método equivalente;
- c) Moldagem dos corpos de prova, por impacto (50 golpes para pressão de pneu até 7 Kgf/cm<sup>2</sup> e 75 golpes para pressão de pneu de 7 Kgf/cm<sup>2</sup> a 14 Kgf/cm<sup>2</sup>) de um soquete padronizado, com 4.540g de massa e 45 cm de altura de queda, de no mínimo 3 corpos-de-prova para cada teor de ligante;

- d) Extração dos corpos-de-prova dos moldes, com “colocação”, por no mínimo 12 horas, à temperatura ambiente em superfície lisa e plana.
- e) Pesagem dos Corpos-de-prova ao ar e imersos em água para determinação das características físicas;
- f) Imersão dos corpos-de-prova em banho-maria por 30 a 40 minutos, à  $60^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$  (CAP). Após este tempo os corpos-de-prova deverão ser enxugados e colocados no molde de compressão, centrando-os no prato da prensa Marshall onde serão submetidos ao ensaio de ruptura (Marshall) para determinação das características mecânicas estabilidade e fluência;
- g) Escolha do teor ótimo de ligante com base em cinco gráficos cartesianos onde em abscissas estão os teores de ligante utilizados e, em ordenadas, as médias dos valores da estabilidade, da fluência, dos vazios não preenchidos, da relação-betume-vazios e da densidade aparente correspondentes a cada teor de ligante.

Segundo HILLS (1973), uma das propriedades mais importantes de uma mistura asfáltica é a sua estabilidade, ou seja, sua habilidade em resistir à deformação permanente quando sujeita à passagem de veículos ou mesmo quando sujeita aos veículos estacionados. Entretanto, testes laboratoriais como, por exemplo, o ensaio Marshall, para concretos asfálticos, idealizados para medir a estabilidade dessas misturas, são empíricos em sua essência. No caso do ensaio Marshall os resultados laboratoriais foram correlacionados com a *performance* dos revestimentos rodoviários e de pistas de aeroportos e portanto, seus testes em corpos-de-prova não podem ser usados para prever o sucesso ou o fracasso de um pavimento com absoluta certeza.

Segundo SHULER et al (1992), em estudos com misturas betuminosas com asfalto modificado, a estabilidade Marshall tendeu a crescer em comparação às das misturas de controle usadas na pesquisa mas, considera que os parâmetros Marshall não esclarecem devidamente as diferenças entre os materiais estudados.

### 3.7 - FLUÊNCIA POR COMPRESSÃO UNIAXIAL ESTÁTICA

Segundo COELHO (1996), o ensaio de fluência por compressão uniaxial estática ou *creep* estático como também é conhecido, é baseado na experiência clássica de Newton, para análise do fluxo viscoso. Tomou impulso na década de 70 como ensaio cujos resultados, avaliariam as características da mistura asfáltica, a partir das pesquisas realizadas nos laboratórios da Companhia Shell de Amsterdã, na Holanda.

A interpretação teórica deste ensaio foi desenvolvida por J.F.Hills e publicada em artigo do *Journal of the Institute of Petroleum* de novembro de 1973.

Em 1974, P.J. de Loo, publicou um artigo na *Association of Asphalt Paving Technologists*, onde descreveu um estudo comparativo entre o método Marshall, de fluência por compressão uniaxial estática e de trilha-de-roda concluindo que o *creep* estático é mais representativo do que o ensaio Marshall quando comparados ao ensaio de trilha-de-roda. Neste estudo foram analisados onze tipos de misturas betuminosas, sendo que oito continham seixo e areia como agregados.

Em 1976, o mesmo autor publicou um artigo no *Transportation Research Record*, propondo o método Shell que através do ensaio de *creep* estático, permitiria estimar a deformação nas trilhas-de-roda (deformação permanente) baseada no módulo de rigidez da mistura, que por sua vez, seria obtido em função do módulo de rigidez do asfalto. Em 1978, publicou outro artigo na *Association of Asphalt Paving Technologists*, onde mostrou estudos detalhados sobre o ensaio de fluência de compressão uniaxial estático.

O ensaio de fluência por compressão uniaxial estática consiste, em linhas gerais, na aplicação de cargas de compressão estática e de valores constante, em corpos-de-prova, por um período de tempo predeterminado sob condições de temperatura padronizada, mantida constante ao longo do ensaio.

O Brasil ainda não possui um método de ensaio de fluência por compressão uniaxial estática normatizado, mas o ensaio já foi testado em algumas universidades brasileiras e basicamente o procedimento é composto de:

- a) Moldagem dos corpos-de-prova por compactador Marshall;
- b) Condicionamento térmico dos corpos-de-prova na temperatura prevista para o ensaio, geralmente 40°C;
- c) Precondicionamento do corpo-de-prova mediante a aplicação, durante dois minutos, da carga de ensaio, seguido de um período de cinco minutos de recuperação do corpo-de-prova (descanso);
- d) Imediatamente após o período de recuperação do corpo-de-prova, inicia-se o ensaio com a aplicação da carga de ensaio, que é mantida durante um período de sessenta minutos; durante esse período os deslocamentos axiais são medidos em intervalos de tempo de trinta segundos, durante os primeiros cinco minutos do ensaio e depois as deformações axiais são medidas a cada um minuto até completar trinta minutos de ensaio e posteriormente até o fim do período do ensaio os deslocamentos axiais são medidos a cada cinco minutos;
- e) Em seguida a carga é retirada e o deslocamento axial permanente ( $\Delta h_{75}$ ) é medido a cada sessenta segundos até completar o tempo do ensaio de recuperação, normalmente com duração de quinze minutos;
- f) A deformação permanente específica viscosa ou visco-plástica ( $\epsilon_{vp}$ ) é calculada:

$$\epsilon_{vp} = \frac{\Delta h_{75}}{h_o} \quad (3.1)$$

Onde:

$\Delta h_{75}$  = variação da altura do corpo-de-prova após o período de recuperação final, ou seja, após setenta e cinco minutos do início do carregamento de ensaio, em mm.

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

Obervação:

As deformações axiais específicas ( $\epsilon_t$ ) em qualquer instante “t” do ensaio são calculadas por:

$$\epsilon_t = \frac{\Delta h_t}{h_o} \quad (3.2)$$

Onde:

$\Delta h_t$  = variação da altura do corpo-de-prova após um tempo “t” de ensaio em relação à altura inicial ( $h_0$ )

Segundo COELHO (1996), a fim de limitar as deformações permanentes das camadas asfálticas no campo, a níveis aceitáveis, alguns pesquisadores têm sugerido valores-limites para a rigidez da mistura, medida através de ensaios de fluência, realizados em laboratório, com carregamento estático, sob condições específicas de temperatura e de tempo de carregamento. Na TABELA 3.10 estão mostrados exemplos de valores de módulo de rigidez, obtidos do ensaio de *creep* estático, para limitação da ocorrência de deformação permanente.



TABELA 3.10 – Exemplos de valores de módulo de rigidez, obtidos do ensaio de *creep* estático, para limitação da ocorrência de deformação permanente (SOUZA et al<sup>3</sup> apud COELHO, 1996)

REFERÊNCIA	TEMPERATURA	TEMPO	TENSÃO	RIGIDEZ
	DO	DE	APLICADA,	DA
	ENSAIO	ENSAIO	$\sigma_0$	MISTURA
	(°C)	(min)	MPa (psi)	MPa (psi)
VILJOEN et al <sup>7</sup> . (1981)	40	100	0,2 (30)	≥ 80 (12.000)
KRONFUSS et al <sup>8</sup> . (1984)	40	60	0,1 (15)	≥ 50-65 (7.500- 10.000)
FINN et al <sup>9</sup> . (1983)	40	60	0,2 (30)	≥ 135 (20.000)

MAHBOUB & LITTLE<sup>10</sup> apud LITTLE et al. (1993) desenvolveram um critério para análise das misturas betuminosas através dos resultados fornecidos pelo ensaio de fluência por compressão uniaxial estático, cujos principais pontos são:

<sup>7</sup> VILJOEN, W. & MEADOWS, K. The Creep Test – A mix design tool to rank asphalt mixes in terms of their resistance to permanent deformation under heavy traffic. Publ. Por National Institute for Transport and Road Research, Petroria, África do Sul, Technical Note TP – 36-81, 1981

<sup>8</sup> KRONFUSS, F.; KRZEMIEN, R.; NIEVELT, G.; PUTZ, P. Verformungsfestigkeit von asphalt en ermittlung im kriechtest. Publ. Por Bundesministerium fur bauten and technik, Strassenforschung, Heft 240, Wien, Austria.

<sup>9</sup> FINN, F.; MONISMITH, C.L.; MARKEVICH, N.J. Pavement performance and asphalt concrete mix design. The Association of Asphalt Paving Technologists, Proceedings, vol.52, 1983.

<sup>10</sup> MAHBOUB, K. & LITTLE, D.N. Improve Asphalt Concrete Mixture Design. Research Report 2474 – IF. Texas Transportation Institute, 1988.

- a) A temperatura de ensaio deve ser de 40°C, com duração de sessenta minutos.
- b) Determina-se a intensidade de tráfego rodoviário onde a mistura será aplicada, através de equivalências em termos de operações de um eixo-padrão de projeto previsto para os 180 dias mais quentes do ano.
- d) Determina-se o nível de tensão normal em que o ensaio será realizado que, na maioria dos casos estará compreendida entre 344,8 e 413,7 Kpa.
- d) Executa-se o ensaio de fluência por compressão uniaxial estático, conforme procedimentos mencionados anteriormente.
- e) Medem-se as deformações axiais durante 1 hora (com pelo menos um ponto a cada 100 segundos) e traça-se a curva de fluência em escala aritmética. O objetivo deste procedimento é a verificação de ocorrência de colapso durante o ensaio.
- f) Determina-se o trecho de fluência uniforme na curva de fluência, aproximadamente entre 1000 e 3600 segundos.
- g) Calculam-se a declividade média “b” da curva de fluência no intervalo acima, a deformação permanente ( $\epsilon_{vp}$ ) e o módulo de rigidez à fluência ( $M_F = \sigma / \epsilon_{vp}$ ). Com os valores assim obtidos e utilizando as TABELA 3.11 e TABELA 3.12, pode-se, avaliar a qualidade da mistura quanto à sua capacidade (potencial) de resistir às deformações permanentes nas trilhas-de-roda ou seja, mantendo as deformações permanentes de trilhas-de-roda em níveis baixos ou reduzidos.
- g) Caso a mistura examinada seja rejeitada para o nível de tráfego pretendido, alteram-se os teores e/ou as características tanto dos agregados como do asfalto.

TABELA 3.11 – Avaliação das misturas betuminosas com b,  $\epsilon_{vp}$  (MAHBOUB & LITTLE<sup>11</sup> apud LITTLE et al. ,1993)

Deformação total após 1 h de carregamento ( $\epsilon_{vp}$ ) - %	Declividade (b) do trecho de fluência uniforme					
	< 0,17	< 0,20	< 0,25	< 0,30	< 0,35	< 0,40
< 0,25	IV <sup>2</sup>	IV <sup>2</sup>	IV <sup>2</sup>	IV <sup>2</sup>	IV <sup>2</sup>	III
< 0,40	IV <sup>2</sup>	IV <sup>2</sup>	IV <sup>2</sup>	III <sup>2</sup>	III <sup>2</sup>	III <sup>2</sup>
< 0,50	IV <sup>2</sup>	IV <sup>2</sup>	III <sup>2</sup>	III <sup>2</sup>	III <sup>2</sup>	II
< 0,80	III <sup>2</sup>	III <sup>2</sup>	II	II	II	II
< 1,00	I	I	I	I	I <sup>1</sup>	-
< 1,20	I <sup>1</sup>	I <sup>1</sup>	I <sup>1</sup>	-	-	-

NOTAS:

- Tráfego de intensidade baixa: < 10<sup>5</sup> ESALs (*Equivalent Single Axle Load*- eixo padrão de projeto);
- Tráfego de intensidade moderada: entre 10<sup>5</sup> e 5X10<sup>5</sup> ESALs;
- Tráfego de intensidade alta: entre 5X10<sup>5</sup> e 10<sup>6</sup> ESALs;
- Tráfego de intensidade muito alta: > 10<sup>6</sup> ESALs;

<sup>1</sup> Deve-se ter também  $\epsilon_{vp} < 0,8\%$  após 1800 segundos de carga de fluência;

<sup>2</sup> Deve-se também atender ao critério dado pela seguinte equação:

$$\epsilon_{vp} + \epsilon_{rt} < \epsilon_{qu} \quad (3.3)$$

<sup>11</sup> MAHBOUB, K.& LITTLE,D.N..Improve Asphalt Concrete Mixture Design. Research Report 2474 – IF. Texas Transportation Institute, 1988.

onde :

- $\epsilon_{vp}$  = deformação permanente medida no *creep test*;
- $\epsilon_{rt}$  = deformação resiliente total, medida num ensaio de resiliência uniaxial (*uniaxial dynamic test*), determinada para uma frequência de carga de 1 ciclo por segundo (carregamento de 0,1 segundo de duração seguido de um período de recuperação de 0,9 segundos);
- $\epsilon_{qu}$  = deformação obtida de um ensaio de compressão não-confinada, de acordo com método de ensaio ASTM T 167.

TABELA 3.12 – Avaliação de misturas betuminosas através dos módulos de rigidez à fluência – ( $M_F$ ) (MAHBOUB & LITTLE<sup>11</sup> apud LITTLE et al., 1993)

Resistência às deformações na trilha de roda	Nível de intensidade de tráfego	Valor mínimo requerido do módulo de rigidez à fluência, MPa, para nível de tensão de ensaio de:		
		207 HPa	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	69,0
“	II	24,1	41,4	51,7
“	I	17,2	20,7	27,6

Segundo MAHBOUB (1990), o *creep* estático inicialmente desenvolvido pelos pesquisadores da *Shell*, enquadra-se perfeitamente como método para caracterização

do potencial de deformação permanente, entretanto recomenda que a temperatura escolhida para este teste deve ser a temperatura crítica de acordo com o clima da região em estudo, sugerindo que a média das mais altas temperaturas mensais seja considerada como a temperatura crítica para a deformação permanente.

Para VALKERING et al (1990), o ensaio de fluência uniaxial estático não diferencia o aumento de resistência à deformação permanente nos asfaltos modificados, entretanto é ótimo para prever a resistência à deformação permanente nas misturas com asfalto convencional.

Segundo o INSTITUTO BRASILEIRO DE ASFALTO (1996), os ensaios clássicos de caracterização das misturas betuminosas, o ensaio Marshall e o ensaio *creep* estático, que utilizam cargas constantes, não permitem que os corpos-de-prova se comportem elasticamente, subestimando a resistência à deformação plástica dos asfaltos modificados.

Para TAYEBALI (1992), para misturas betuminosas contendo asfaltos modificados, os ensaios com aplicação de carga dinâmica parecem representar melhor o potencial de deformação permanente nas trilhas de roda.

Segundo CORTÉ (1994), o *creep* dinâmico, comparado aos testes estáticos, é mais representativo com relação à *performance* no campo.

### **3.8 – ENSAIO PARA DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL**

“O ensaio de tração indireta por compressão diametral, conhecido como “Ensaio Brasileiro”, foi desenvolvido por Lobo Carneiro e Barcelos no Brasil e independentemente por Akazawa no Japão, para determinar a resistência à tração de corpos-de-prova de concreto cimento, através de sollicitação estática” (PINTO & PREUSSLER, 1980).

Segundo o DNER-ME 138/94, os corpos-de-prova destinados ao ensaio podem ser obtidos diretamente do campo por extração através de sonda rotativa ou fabricado em laboratório, de forma cilíndrica, com altura entre 3,50 cm a 6,50 cm e diâmetro de  $10 \pm 0,2$  cm e os procedimentos de ensaio basicamente são:

- a) Medir a altura (H) do corpo-de-prova com um paquímetro, em quatro posições diametralmente opostas. Adotar como altura a média aritmética das quatro leituras;
- b) Medir o diâmetro (D) do corpo-de-prova com o paquímetro, em três posições paralelas. Adotar como diâmetro o valor da média aritmética das três leituras;
- c) Colocar o corpo-de-prova na estufa ou sistema de refrigeração, por um período de 2 (duas) horas, de modo a se obter a temperatura especificada para o ensaio, 25°C, 30°C, 45°C, ou 60°C.
- d) Ajusta-se os pratos da prensa até que seja obtida uma leve compressão, capaz de manter em posição o corpo-de-prova;
- e) Aplica-se a carga progressivamente, com uma velocidade de deformação de  $0,8 \pm 0,1$  mm/s, até que se dê a ruptura, por separação do corpo-de-prova em duas metades, segundo o plano diametral vertical. Anota-se a carga de ruptura (F).
- f) Calcula-se a resistência à tração do corpo-de-prova rompido por compressão diametral, pela expressão:

$$\sigma_t = \frac{2F}{\pi\phi H} \quad (3.4)$$

Onde:

$\sigma_t$  – resistência à tração, Kgf/cm<sup>2</sup>;

F – carga de ruptura, Kgf;

$\phi$  – diâmetro do corpo-de-prova, cm;

H – altura do corpo-de-prova, cm.

PINTO & PREUSLLER (1980), em estudos com módulos resilientes de concretos asfálticos, identificaram determinados intervalos de variação para a resistência à tração (TABELA 3.13). Os parâmetros encontrados estão correlacionados à temperatura ambiente, às especificações e procedimento de projeto segundo as normas adotadas pelo DNER, aos agregados tipo gnaiss e gnaiss granitóide, aos cimentos asfálticos CAP 50/60 e CAP 85/100 e aos teores de betume variando entre 4,3% a 6,5%. Os intervalos de variação da resistência à tração independem da faixa granulométrica do agregado.

TABELA 3.13 - Intervalos de variação para a resistência à tração (PINTO & PREUSLLER , 1980)

TIPO DE CAP	VARIAÇÃO DE $\sigma_t$ (Kgf/cm <sup>2</sup> )
CAP 50/60	6,70 a 9,60
CAP 85/100	4,41 a 7,10

Para anteprojeto ou projetos de estradas secundárias, MOTTA & PINTO (1994), sugerem que o módulo de resiliência seja estimado a partir do resultado do ensaio de resistência à tração por compressão diametral estático através da seguinte relação:

$$MR = 343 + 4028\sigma_t \quad (3.5)$$

Onde:

MR = módulo de resiliência;

$\sigma_t$  = resistência à tração por compressão diametral;

### 3.9 - MÓDULO DE RESILIÊNCIA POR COMPRESSÃO DIAMETRAL

Segundo PINTO & PREUSSLER (1980), o ensaio de módulo de resiliência surgiu a partir dos ensaios de resistência à tração por compressão diametral quando optou-se por determinar o módulo de elasticidade dinâmico de misturas betuminosas e materiais cimentados.

O ensaio de módulo de resiliência é normatizado no Brasil pela norma DNER-ME 133/94, de utilidade para projeto de pavimentos flexíveis e em linhas gerais, os procedimentos para o ensaio são:

- a) Moldagem do corpo-de-prova conforme procedimentos descritos no ensaio Marshall.
- b) Posiciona-se o corpo-de-prova na base da estrutura de suporte, entre dois cabeçotes curvos.
- c) Fixa-se e ajusta-se os transdutores mecânico-magnéticos tipo LVDT (Linear variable differential transformer) de modo a se obter o registro dos deslocamentos.
- d) Observa-se o perfeito assentamento do pistão de carga e dos cabeçotes no corpo-de-prova.
- e) Aplica-se 200 vezes uma carga vertical repetida (F) diametralmente no corpo-de-prova, de modo a se obter uma tensão ( $\sigma_t$ ) menor ou igual a 30% da resistência à tração determinada no ensaio de compressão diametral estático. Recomenda-se a aplicação da menor carga (F), capaz de fornecer um registro mensurável. A frequência de aplicação da carga (F) é de 60 ciclos por minuto com duração de



0,10 segundo. Registra-se o deslocamento resiliente para 300,400 e 500 aplicações de carga (F).

- f) Com os valores obtidos são calculados os módulos de resiliência através da expressão:

$$MR = \frac{F(0,997\mu + 0,2692)}{100\Delta h} \quad (3.6)$$

Onde:

MR = módulo de resiliência, MPa.

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

$\Delta$  = deformação elástica ou resiliente registrada no oscilógrafo, para 300, 400 e 500 aplicações de carga (F), cm.

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

$\mu$  = coeficiente de Poisson.

NOTAS:

- Recomenda-se o valor de 0,30 para o coeficiente de Poisson;
- O módulo de resiliência do corpo-de-prova ensaiado será a média aritmética dos valores determinados a 300, 400 e 500 aplicações de carga (F);
- Quando a temperatura de ensaio não for especificada, o módulo de resiliência deverá ser determinado na temperatura de  $30^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ .

Segundo PREUSSLER (1983), a expressão citada anteriormente para a determinação do módulo de resiliência das misturas asfálticas só é adequada se o carregamento repetido for “pontual” e de curta duração, devido ao fato de se tratar de materiais viscoelásticos, onde o comportamento viscoso da massa asfáltica deve ser minimizado.

PINTO & PREUSSLER (1980), recomendam para as misturas betuminosas com teores de asfalto variando de 4,3% a 6,5% os seguintes intervalos para o módulo de resiliência:

TABELA 3.14 - Intervalos de variação para o módulo de resiliência (PINTO & PREUSLLER , 1980)

TIPO DE CAP	TIPO DE CAMADA	
	CAPA (Kgf/cm <sup>2</sup> )	BINDER (Kgf/cm <sup>2</sup> )
CAP50/60	27000 - 43000	27000 – 49000
CAP 85/100	19000 - 30000	22000 – 30000

NOTA:

Os parâmetros acima estão correlacionados à temperatura ambiente, às especificações e procedimento de projeto segundo as normas adotadas pelo DNER, agregados tipo gnaisse e gnaisse granitóide, cimentos asfálticos CAP 50/60 e CAP 85/100 e teores de betume variando entre 4,3% a 6,5%. Os intervalos de variação da resistência à tração independem da faixa granulométrica do agregado.

Segundo MOTTA (1998), de uma forma simplificada, pode-se dizer que o módulo resiliente varia com a granulometria da mistura sendo maior quanto mais grossa for a faixa adotada; varia com o ligante asfáltico sendo maior quanto menor a penetração do asfalto ou maior a sua viscosidade, mas não é muito sensível ao teor de asfalto, dentro da faixa normal de dosagem.

Vale ressaltar que ultimamente tem-se utilizado em projetos de dimensionamento de pavimentos a relação do módulo de resiliência (MR) com a tensão de ruptura de tração ( $\sigma_t$ ) dos revestimentos asfálticos, em vista de ser um indicativo da capacidade de retorno elástico das misturas asfálticas e sua resistência ao trincamento por tração frente às solicitações do tráfego e também por permitir uma forma expedita de inferir

o módulo resiliente de uma mistura asfáltica, através de dados de mais fácil obtenção como é o caso da resistência à tração ( $\sigma_t$ ), como é sugerido em MOTTA (1998).

Relações  $MR/\sigma_t$  encontradas para misturas betuminosas a quente com ligantes convencionais, ensaiadas à 25°C:

a) PINTO (1991):

$$MR = 6461\sigma_t, \text{ com } r^2 = 0,96 \quad (3.7)$$

b) MOTTA & PINTO (1994):

$$MR = 4385\sigma_t \quad (3.8)$$

c) Procedimento de reforço DNER PRO 269/96:

$$MR = 5000\sigma_t \quad (3.9)$$

Relação  $MR/\sigma_t$  encontrada para misturas betuminosas a quente com ligantes modificados, ensaiada à 25°C:

a) MOTTA (1998):

$$MR = 3000 \text{ a } 3500\sigma_t \quad (3.10)$$

Segundo CERATTI et al (1996), a susceptibilidade das misturas asfálticas pode ser investigada pela variação do módulo de resiliência com a temperatura. As misturas betuminosas apresentam fluência sob tensões em temperatura elevada, originando deformações permanentes e em baixas temperaturas, devido ao processo de enrijecimento, é formada uma condição propícia para o desenvolvimento de fissuras por fadiga.

## **CAPÍTULO 4**

### **PROGRAMA EXPERIMENTAL REALIZADO**

---

#### **4.1 – INTRODUÇÃO**

No Estado do Pará a maioria dos pavimentos tem como agregado graúdo o seixo rolado. Tal procedimento deve-se ao fato de que existe uma carência de recursos pétreos com volume suficiente para o atendimento da demanda, conforme é esclarecido em ofício do 2º DRF/DNER constante do ANEXO I. Em vista disso e do interesse crescente no país por asfaltos modificados, esta pesquisa propõe-se a avaliar a vantagem ou desvantagem de utilizar-se asfalto modificado com polímero em misturas densas do tipo CBUQ com seixo rolado como agregado graúdo.

Neste capítulo descrevem-se os materiais utilizados, os procedimentos realizados no laboratório para a seleção e caracterização dos materiais assim como os procedimentos de laboratório relativos ao preparo dos materiais, moldagem dos corpos-de-prova e à execução dos ensaios Marshall, fluência por compressão uniaxial estática, resistência à tração por compressão diametral e módulo de resiliência por compressão diametral.

#### **4.2 – MATERIAIS EMPREGADOS NA PESQUISA**

##### **4.2.1 – Natureza e procedência**

#### 4.2.1.1 - Agregados

O agregado graúdo é seixo rolado lavado e classificado em peneira vibratória, coletado no Município de São Miguel do Guamá-Pa, distante 170 Km da cidade de Belém. Trata-se de depósito de seixo rolado quartzoso. As FIGURAS 4.1 e 4.2 mostram a Jazida Santo Amaro.



FIGURA 4.1 – Vista geral da jazida Santo Amaro



FIGURA 4.2 – Jazida Santo Amaro

O agregado apresenta superfície rugosa, com massa específica em torno de  $2,649 \text{ g/cm}^3$  e é observada a incidência de grãos com arestas faceadas de forma cúbica, sendo insatisfatória a sua adesão frente ao cimento asfáltico do petróleo (CAP).

No Estado do Pará, em especial na capital Belém, o seixo é utilizado em larga escala tanto nos concretos betuminosos bem como nos concretos de cimento Portland, em razão de ser encontrado em maior quantidade e com custo menor de extração comparado ao da pedra britada, que se encontra a cerca de 200 Km de Belém.

As areias do Estado do Pará não se enquadram granulometricamente na faixa de trabalho escolhida, a “faixa C” do DNER, principalmente com relação às peneiras de nº 40 e de nº 80, fazendo-se necessária a mistura de dois tipos para o enquadramento.

Foram utilizadas, nesse trabalho, dois tipos básicos de areia quanto à granulometria; uma areia mais fina (tipo A), com diâmetro variando de 2,00 mm até 0,18 mm e outra areia (tipo B), mais grosseira, com diâmetro variando de 4,8 mm a 0,074 mm, ambas da região de Americano-Pa, distante 50 Km de Belém.

Na FIGURA 4.3 é mostrado a localização dos municípios onde se encontram as jazidas.

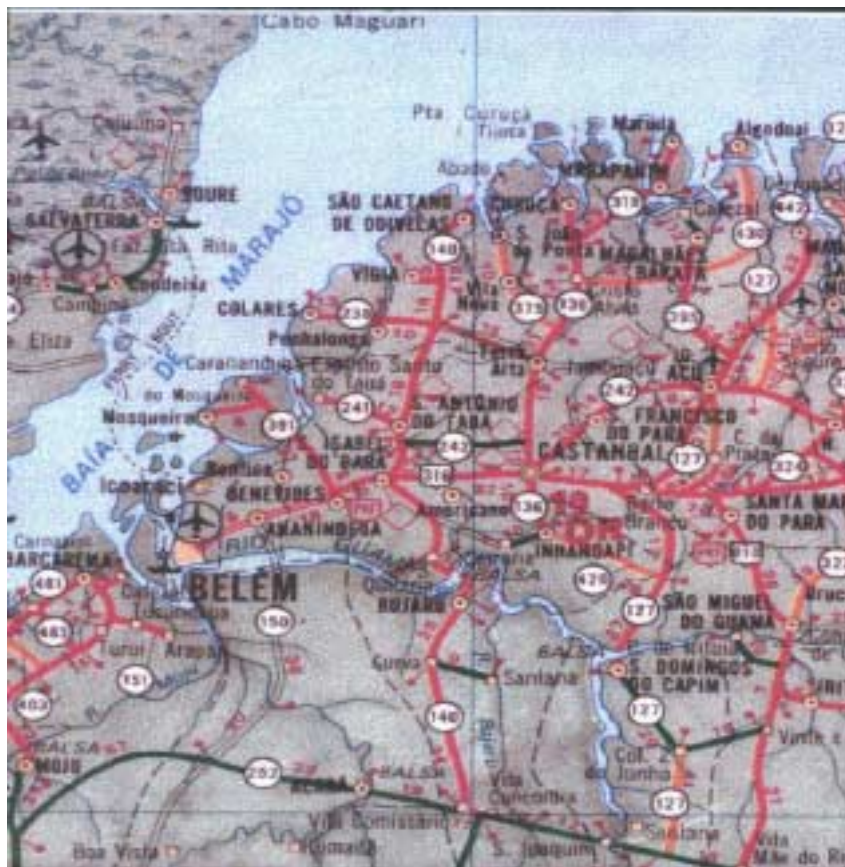


FIGURA 4.3 – Mapa da região onde ficam as jazidas

A distribuição granulométrica escolhida foi a “faixa C” do DNER (DNER ES 313/97). Para a obtenção da mistura de agregados foram misturados o seixo e as areias em proporções convenientes de tal forma a obter-se um produto cuja granulometria situa-se, aproximadamente, no centro da faixa escolhida.

Na FIGURA 4.4 é apresentada a granulometria dos agregados e na FIGURA 4.5 a distribuição granulométrica utilizada – Centro da “faixa C” do DNER. Na TABELA 4.1 estão mostradas as características físicas dos agregados usados na pesquisa.

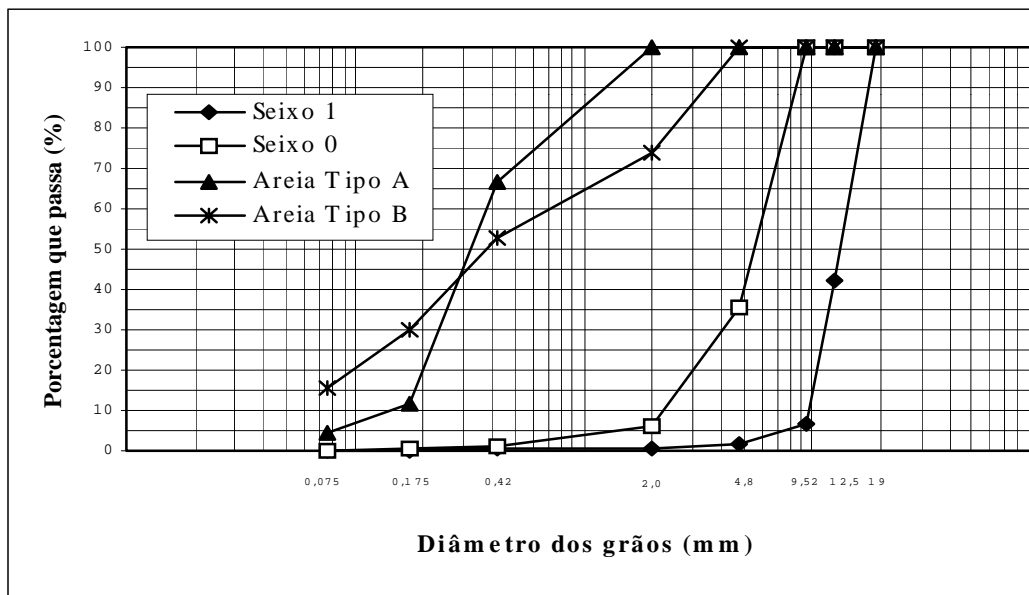


FIGURA 4.4 – Granulometria dos agregados

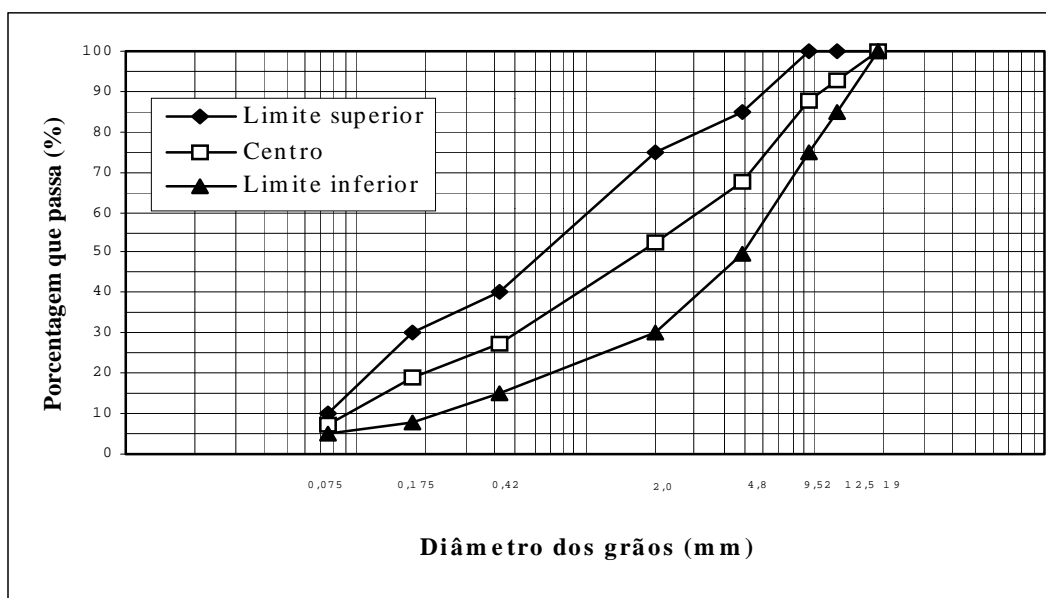


FIGURA 4.5 – Faixa granulométrica "C" do DNER (DNER-ES 313/97/DNER-ES 385/99)



TABELA 4.1 – Características Físicas dos Agregados usados na pesquisa.

ENSAIO	MÉTODO	AGREG. GRAÚDO	AGREG..MIÚDO	
			AREIA TIPO A	AREIA TIPO B
Densidade Real	DER/SP M3-61	2,649	2,645	2,627
Abrasão Los Angeles	DER/SP M35-64	57,95% (≤ 50%)	**	**
Adesividade do Agregado Graúdo ao CAP-40	DNER ME 78-63	Não satisfatória	**	**
Adesividade do Agregado Miúdo ao CAP-40	DER/SP M149-61	**	Má	Má
Adesiv. do Agreg. Graúdo ao CAP-40 + DOPE	DNER ME 78-63	Não satisfatória	**	**
Adesiv. do Agreg. Miúdo ao CAP-40 + DOPE	DER/SP M149-61	**	Má	Má

#### 4.2.1.2 Material de Enchimento:

O material de enchimento (filler) utilizado foi calcáreo, procedente do Estado do Ceará, explorado e comercializado pela Calcário Itamil, Itaoca Mineração Ltda. A granulometria do filler utilizado foi passando 100% na peneira de Nº 200.

Na FIGURA 4.6 são mostrados os agregados e o material de enchimento usados nos corpos-de-prova.



FIGURA 4.6 – Agregados e material de enchimento usados nos corpos-de-prova

#### 4.2.1.3 Aglutinantes

Os asfaltos empregados no presente trabalho são um convencional, do tipo CAP-40 e um modificado com polímero SBS, o Betuflex B 65/60, ambos fornecidos pela Ipiranga Asfaltos S.A.. O BETUFELX B 65/60 foi fabricado a partir do mesmo CAP-40 utilizado nesta pesquisa. Na TABELA 4.2 são apresentadas as características físicas do CAP 40 e do BETUFLEX B 65/60 empregado.

TABELA 4.2 – Características Físicas do CAP 40 e do BETUFLEX B 65/60

<b>CARACTERÍSTICAS</b>	<b>MÉTODOS</b>	<b>CAP-40</b>	<b>BETUFLEX B 65/60</b>
Viscosidade absoluta a 60° C, poise	MB – 827	4276	-
Viscosidade Saybolt Furol,s,135°C,mín.	MB – 517	238	-
Viscosidade Saybolt Furol,s,177°C	MB – 517	34	-
Penetração, 100g, 5s, 25°C, 0,1mm,mín.	MB – 107	40	75,5
Ponto de Fulgor,°C, mínimo	MB – 50	269	-
Ponto de Amolecimento,°C	ASTM D36	47	58
Índice de Susceptibilidade Térmica		-2,4	1,72

#### **4.2.1.4 Melhorador de Adesividade**

Aos ligantes anteriormente citados foi adicionado 0,5% em peso do aditivo melhorador de adesividade (BETUDOPE), produzido e comercializado pela Ipiranga Asfaltos S.A., a fim de minimizar o problema de adesividade existente nos agregados utilizados nesta pesquisa (DNER-ME 078 e 079).

### **4.3 – DESCRIÇÃO DOS ENSAIOS REALIZADOS**

As principais fases que constituíram o trabalho de laboratório foram:

- a) Seleção, caracterização e preparação dos agregados;
- b) Seleção, caracterização e preparação dos aglutinantes;
- c) Dosagem da mistura betuminosa pelo método da superfície específica de acordo com a DER M 148-60;
- d) Moldagem dos corpos-de-prova, de acordo com a ABNT/ NBR 12891/93;
- e) Realização dos ensaios Marshall de acordo com a ABNT/NBR 12891/93;
- f) Realização dos ensaios de fluência por compressão uniaxial estática;
- g) Realização dos ensaios para determinação da resistência à tração de acordo com a DNER-ME 138/94;
- h) Realização dos ensaios de módulo de resiliência de acordo com a DNER-ME 133/94.

#### **4.3.1 Seleção, Manuseio e Preparação dos Agregados**

Os agregados e o material de enchimento foram secos em estufa à 50°C durante 12 horas e peneirados manualmente nas frações correspondentes a cada uma das peneiras especificadas na norma do DNER (DNER-ES 313/97), sendo cada fração armazenada individualmente em sacos plásticos devidamente etiquetados. Os agregados foram então submetidos aos ensaios de peso específico e aos ensaios de adesividade do ligante ao agregado miúdo, adesividade do ligante ao agregado graúdo e abrasão Los Angeles, conforme resultados apresentados na TABELA 4.1.

Após o peneiramento as frações foram recombinações nas proporções pertinentes a cada corpo-de-prova em acordo com a distribuição granulométrica estabelecida, no centro da faixa “C” do DNER, conforme mostra a TABELA 4.3.

TABELA 4.3 – Quantidade de agregados e filler para composição de um corpo-de-prova.

Peneira (mm)	Granulometria		Massa de agregado e material de enchimento por faixa (g)			
	Porcentagem que passa (%)	Porcentagem retida (%)	Seixo	Areia Tipo A	Areia Tipo B	Filler
19,1 – 12,7	100,0 – 92,5	7,5	90,0	-	-	-
12,7 – 9,50	92,5 – 87,5	5,0	60,0	-	-	-
9,52 – 4,76	87,5 – 67,5	20,0	240,0	-	-	-
4,80 – 2,00	67,5 – 52,5	15,0	-	-	180,0	-
2,00 – 0,42	52,5 – 27,5	25,0	-	150,0	150,0	-
0,42 – 0,18	27,5 – 19,0	8,5	-	51,0	51,0	-
0,18 – 0,074	19,0 – 7,5	11,5	-	-	138,0	-
0,074-Fundo	7,5 – 0	7,5	-	-	54,0	36,0
TOTAL		100	SOMATÓRIA GERAL = 1200,0 g			

#### 4.3.2 - Seleção, Manuseio e Preparação dos Aglutinantes

O CAP-40 foi submetido aos ensaios de penetração, ponto de fulgor, densidade, ponto de amolecimento, viscosidade Saybolt-Furol e viscosidade absoluta. O BETUFLEX B 65/60 foi submetido aos ensaios de ponto de amolecimento e penetração.

Os asfaltos foram previamente dopados com BETUDOPE para serem utilizados na moldagem dos corpos de prova.

### 4.3.3 - Dosagem da mistura betuminosa

A dosagem da mistura betuminosa no projeto experimental foi feita segundo o método da superfície específica, de acordo com a M 148-60 do DER-SP, que consiste basicamente em:

a) Cálculo da superfície específica do agregado:

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

Onde:

S = superfície específica do agregado, em m<sup>2</sup>/Kg;

G = % retida na # 9,52 mm;

g = % passada na # 9,52 mm e retida na # 4,76 mm;

A = % passada na # 4,76 mm e retida na # 0,297 mm;

a = % passada na # 0,297 mm e retida na # 0,074 mm;

f = % passada na # 0,074 mm.

b) Cálculo do teor de cimento asfáltico:

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

Onde:

T<sub>ca</sub> = teor de asfalto em relação à massa de agregado mineral, em %;

M = módulo de riqueza em asfalto, variável de 3,75 a 4,00;

S = superfície específica do agregado calculada, m<sup>2</sup>/Kg.

c) Teor de cimento asfáltico corrigido:

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

Onde:

$T'_{ca}$  = teor de asfalto corrigido devido à densidade do agregado mineral, em %;

$T_{ca}$  = teor de asfalto em relação à massa de agregado mineral calculado, em %;

$\delta_{am}$  = densidade do agregado mineral.

d) Porcentagem de cimento asfáltico:

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

Onde:

$P_{ca}$  = porcentagem de asfalto em relação à mistura em massa, em %;

$T'_{ca}$  = teor de asfalto corrigido calculado.

O  $P_{ca}$  encontrado nesta pesquisa foi 6,3% e portanto os teores de ligante encontrados são: 5,3%, 5,8%, 6,3%, 6,8% e 7,3%

Entretanto, os teores encontrados não foram utilizados, pois considerou-se que estariam elevados por se tratar de uma mistura com agregados de origem quartzosa, optou-se por alterá-los para: 4,5%, 5,0%, 5,5%, 6,0% e 6,5%

Os quinze primeiros corpos-de-prova foram feitos com os teores de asfalto mencionados anteriormente. Após determinarmos suas massas ao ar e imersa e mediante o traçado das curvas de RBV e  $V_v$  para nos certificarmos que os teores escolhidos estariam coerentes,

optou-se por mais uma mudança em seus valores. Os novos teores de asfalto escolhidos para a moldagem dos corpos-de-prova foram: 4,0%, 4,5%, 5,0%, 5,5% e 6,0%

#### **4.3.4 - Moldagem dos Corpos de Prova**

Os corpos-de-prova, cujas distribuições granulométricas enquadram-se no centro da faixa “C” do DNER, foram confeccionados segundo o método Marshall para misturas betuminosas. Para a confecção dos corpos-de-prova das misturas betuminosas com asfalto convencional CAP-40, os agregados com o material de enchimento foram aquecidos previamente em estufa à 120°C durante 12 horas e o asfalto convencional dopado foi aquecido previamente em estufa à 120°C durante 4 horas.

Para a confecção dos corpos-de-prova das misturas betuminosas com asfalto modificado, os agregados com o material de enchimento foram aquecidos previamente em estufa à 150°C durante 12 horas e o betuflex B 65/60 dopado foi aquecido previamente em estufa à 150°C durante 4 horas. No momento da mistura dos agregados e material de enchimento com o asfalto convencional, controlou-se a temperatura da mistura com asfalto convencional para obter-se 140°C e a mistura com o asfalto modificado para obter-se 170°C e, a essas temperaturas, os corpos-de-prova foram compactados com energia de setenta e cinco golpes de cada lado, nos cinco diferentes teores de ligante, conforme foi especificado no sub-ítem 4.3.3.

Após a moldagem, os corpos-de-prova foram deixados esfriando sob água corrente à temperatura ambiente, ainda dentro de seus moldes metálicos de compactação durante quinze minutos, sendo em seguida extraídos dos cilindros de compactação e deixados durante vinte e quatro horas em temperatura ambiente sobre superfície plana.

Para cada teor de asfalto foram confeccionados quinze corpos-de-prova, perfazendo um total de setenta e cinco corpos-de-prova para cada tipo de ligante, dos quais cento e vinte corpos-de-prova foram usados nos ensaios.



Após a desmoldagem dos corpos-de-prova, foram feitas 3 (três) medidas da altura e do diâmetro para obter-se valores médios das dimensões dos corpos-de-prova, além deles terem sido submetidos à pesagem ao ar e imersos em água para a determinação da densidade aparente. Os resultados das características físicas dos corpos-de-prova estão no ANEXOII.

#### 4.3.5 – Ensaio Marshall

Na execução do ensaio Marshall segundo a NBR 12891/1993, utilizou-se uma prensa VERSATESTER 30M, com ajuste automático de velocidade e medidor de fluência com leitura direta com graduação de 1/100”. Antes de se determinar a estabilidade e a fluência das misturas betuminosas em estudo, os corpos-de-prova foram submetidos a um banho-maria em água à temperatura de 60°C, por trinta minutos. Após o banho-maria, os corpos-de-prova foram colocados dentro dos dois segmentos do molde de compressão e levados à prensa para a determinação da estabilidade e da fluência Marshall.

Os valores de estabilidade Marshall, para ambos os tipos de mistura betuminosa, foram obtidos pelo produto da leitura da deformação máxima registrada no anel dinamométrico acoplado à prensa, pela constante do anel e corrigidas em função da altura dos corpos-de-prova de acordo com a NBR 12891/1993 da ABNT. Os parâmetros necessários à aplicação do método Marshall, foram calculados da seguinte forma:

c) Densidade aparente dos corpos-de-prova:

$$d = \frac{Mar}{Mar - Magua} \quad (4.5)$$

Onde:

d = densidade aparente da mistura;

$M_{ar}$  = massa do corpo de prova ao ar, g;

$M_{agua}$  = massa do corpo de prova imerso em água, g.

b) Densidade máxima teórica:

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

Onde:

$D$  = densidade máxima teórica;

$\%ag$ ,  $\%af$ ,  $\%f$ ,  $\%b$  = porcentagens de agregado gráudo, miúdo, filler e asfalto respectivamente;

$d_{ag}$ ,  $d_{af}$ ,  $d_f$ ,  $d_b$  = densidade real da massa dos grãos do agregado gráudo, agregado miúdo, filler e asfalto respectivamente.

c) Volume de vazios:

$$V_v = 100 \times \left( \frac{D - d}{D} \right) \quad (4.7)$$

Onde:

$V_v$  = volume de vazios, %;

$D$  = densidade máxima teórica;

$d$  = densidade aparente da mistura.

d) Volume de vazios preenchidos pelo asfalto:

$$Vb = \left( \frac{dx\%b}{db} \right) \quad (4.8)$$

Onde:

$V_b$  = volume de vazios preenchido pelo betume, %;

$d$  = densidade aparente da mistura;

$\%b$  = porcentagem de betume, %;

$d_b$  = densidade real de massa de betume.

e) Porcentagem de vazios do agregado mineral:

$$VAM = V_v + V_b \quad (4.9)$$

Onde:

$VAM$  = porcentagem de vazios do agregado mineral, %;

$V_v$  = volume de vazios, %;

$V_b$  = volume de vazios preenchido pelo betume, %.

f) Relação betume vazios:

$$RBV = \frac{100xV_b}{VAM} \quad (4.10)$$

Onde:

$RBV$  = relação betume vazios, %;

$V_b$  = volume de vazios preenchido pelo asfalto, %;

VAM = porcentagem de vazios do agregado mineral, %.

Os resultados encontrados para a estabilidade e a fluência Marshall, bem como o cálculo dos parâmetros Marshall, estão no ANEXOIII.

#### **4.3.6 – Ensaio de fluência por Compressão Uniaxial Estática**

Para o ensaio de fluência por compressão uniaxial estática utilizou-se uma prensa composta de um sistema pneumático para carregamento, um sistema computadorizado para medição dos deslocamentos da amostra e de uma estrutura de suporte com acessórios.

A prensa foi colocada dentro de uma caixa de madeira para que fosse possível a execução do ensaio sob determinada temperatura, sendo esta temperatura controlada através de um dispositivo automático ligado a uma fonte de calor. A caixa de madeira foi construída com uma porta para permitir a colocação e a retirada dos corpos-de-prova, tendo em sua parte frontal um visor de plexiglass para o acompanhamento da temperatura através de um termômetro posicionado dentro da caixa.

O sistema pneumático de carregamento é composto de regulador de pressão para aplicação de carga vertical, válvula de transmissão de carga vertical, cilindro de pressão e pistão de carga. O controle do tempo de abertura da válvula e frequência de aplicação de carga vertical é feito por computador.

O sistema de medição de deformação da amostra é constituído de dois medidores eletromecânicos LVDT (linear variable differential transformer), de um suporte para fixação dos LVDT na amostra e de indicadores digitais de deslocamento e tensão (modelo TMDE).

Os ensaios de fluência por compressão uniaxial estático foram totalmente gerenciados por computador, em programa desenvolvido em linguagem *Labview* e os resultados dispostos em planilha eletrônica, para posterior processamento.

Nos ensaios de fluência por compressão uniaxial estática foi utilizado um carregamento médio de 81Kgf, gerando um tensão normal de 0,1Mpa e temperatura de 40°C.

Os procedimentos para este ensaio foram:

- a) Tanto a altura como o diâmetro dos corpos-de-prova utilizados nos cálculos foram medidos com paquímetro, em três diferentes lugares e tirado a média de suas medidas;
- b) As bases circulares dos corpos-de-prova foram polidas manualmente, resultando em uma superfície adequadamente lisa;
- c) Os corpos-de-prova foram condicionados termicamente em estufa a 40°C, durante um período de aproximadamente 10 horas;
- d) No momento da execução dos ensaios, foi colocado um papel filtro em ambas as superfícies circulares dos corpos-de-prova, na tentativa de evitar a adesão do corpo-de-prova à base do equipamento e à cabeça de aplicação de carga.
- e) Não foi executado um pré-condicionamento dos corpos-de-prova,
- f) Assim que a temperatura dentro da caixa de madeira chegou à 40°C, já com o corpo-de-prova devidamente instalado no prato da prensa e os dados referentes ao corpo-de-prova preenchidos no programa *Labview*, deu-se o início do ensaio de fluência por compressão uniaxial estática.

- g) Após sessenta minutos de ensaio, o programa automaticamente suspendeu a aplicação da carga e iniciou-se o ensaio de recuperação, o qual teve a duração de quinze minutos;
- h) As deformações axiais medidas em cada LVDT durante os setenta e cinco minutos, compreendidos entre os ensaios de fluência e de recuperação, foram calculadas pelo programa automaticamente, bem como as deformações médias e a deformação permanente específica viscosa ou visco-plástica para cada corpo-de-prova.

Os resultados dos ensaios de fluência e de recuperação estão dispostos no ANEXO IV.

#### **4.3.7 – Ensaio para determinação da resistência à tração por compressão diametral**

A determinação da resistência à tração por compressão diametral estática foi feita de acordo com o método de ensaio DNER 138/1994. Neste ensaio foi utilizada a mesma prensa Marshall VERSATESTER 30M, com ajuste automático de velocidade, adaptada para que a carga de compressão seja aplicada ao longo do eixo diametral dos corpos-de-prova.

O ensaio de resistência à tração consistiu dos seguintes passos:

- a) Antes da execução do ensaio, os corpos-de-prova permaneceram durante pelo menos uma hora à temperatura de 25°C;
- b) Os corpos-de-prova foram apoiados ao longo de suas geratrizes por dois frisos de carga posicionados nas suas partes superior e inferior da amostra;
- c) O prato da prensa foi ajustado e o corpo-de-prova corretamente posicionado.

- d) Aplicou-se então uma carga até atingir a ruptura, neste momento fez-se a leitura do deflectômetro do anel dinamométrico e a seguir calculou-se a carga de ruptura. A carga de ruptura  $F$  foi calculada através da multiplicação da leitura do deflectômetro pela constante do anel dinamométrico;
- e) A resistência à tração estática foi calculada pela expressão:

$$\sigma_t = \frac{2F}{\pi\phi H} \quad (4.11)$$

Onde:

$\sigma_t$  = resistência à tração, Kgf/cm<sup>2</sup>;

$F$  = carga de ruptura, Kgf;

$\phi$  = diâmetro do corpo-de-prova, cm;

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

Os resultados destes ensaios estão dispostos no ANEXO V.

#### **4.3.8 – Ensaio de módulo de Resiliência por compressão diametral**

Os ensaios de módulo de resiliência foram realizados no equipamento montado no laboratório de tecnologia de pavimentação da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo e mostrado na FIGURA 4.7.

O equipamento é constituído basicamente de um sistema pneumático de carregamento, de um sistema de medição de deformação da amostra e de uma estrutura de suporte com acessórios.

O sistema pneumático de carregamento é composto de válvula reguladora de pressão para aplicação de carga vertical, pistão cilíndrico de carga e de dispositivo eletrônico regulador do tempo de abertura da válvula solenóide e frequência de aplicação de carga vertical.

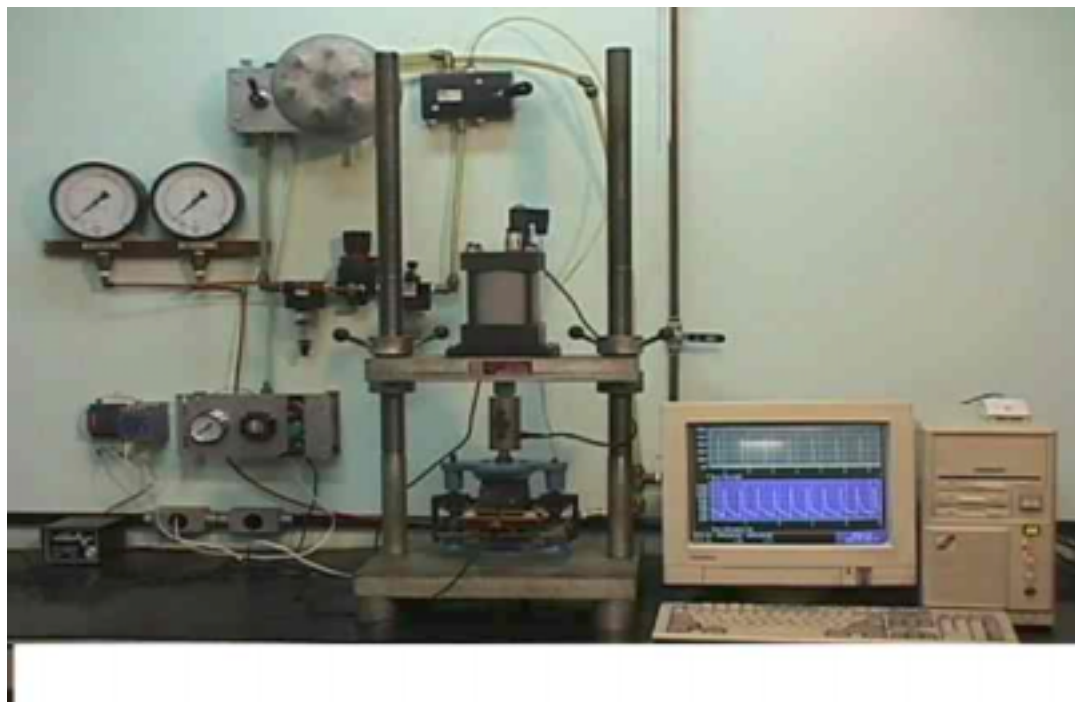


FIGURA 4.7 – Fotografia do equipamento para determinação de módulo de resiliência por compressão diametral usado na pesquisa

As deformações diametraes recuperáveis sofridas pela amostra são medidas por um medidor eletromecânico LVDT (linear variable differential transformer) acoplado ao dispositivo de centralização do corpo-de-prova, que impede a rotação do corpo-de-prova, conforme é mostrado na FIGURA 4.8.

O LVDT é conectado a um módulo condicionador de sinais analógicos modelo MCS/000-V2 da Lynx Tecnologia Eletrônica LTDA. O módulo condicionador de sinais



analógicos então é conectado a um computador que, por sua vez, através de um programa de aquisição de dados, o Aqdados, gerencia em parte o programa.

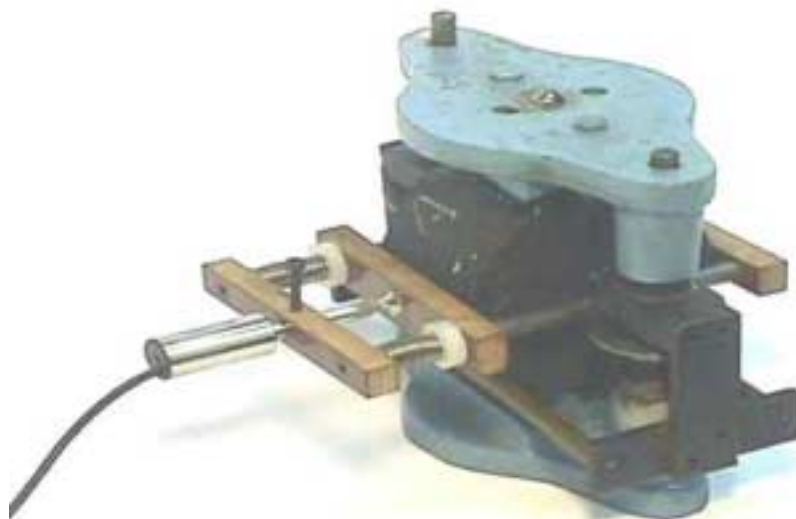


FIGURA 4.8 – Fotografia do dispositivo centralizador de corpo-de-prova do equipamento para determinação de módulo de resiliência por compressão diametral

Os ensaios de módulo de resiliência foram realizados aplicando-se um carregamento cíclico com frequência de 1 Hz, sendo cada ciclo com tempo de aplicação de carga de 0,1 segundo e tempo de repouso de 0,9 segundo, na temperatura de 25°C.

Os procedimentos de ensaio foram feitos segundo a norma do Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, a DNER-ME 133/94. Os resultados estão dispostos no ANEXO VI.

## **CAPÍTULO 5**

# **APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS DOS ENSAIOS DE LABORATÓRIO**

---

### **5.1 – INTRODUÇÃO**

Neste capítulo apresentam-se a estimativa da porcentagem ótima dos ligantes asfálticos para os 150 corpos-de-prova confeccionados e os resultados dos ensaios Marshall, fluência por compressão uniaxial estática, resistência à tração por compressão diametral e módulo de resiliência por compressão diametral.

### **5.2 – ESTIMATIVA DA PORCENTAGEM ÓTIMA DOS LIGANTES ASFÁLTICOS**

Os teores ótimos de ligante foram encontrados a partir da fixação de 4% de volume de vazios. Observando-se as FIGURA 5.1 e a FIGURA 5.2, nota-se que os teores ótimos obtidos segundo esse critério são iguais a 4,54% e 4,44%, respectivamente, para o asfalto convencional (CAP-40) e para o asfalto modificado (BETUFLEX B 65/60). As diferenças entre o teor ótimo apresentado no subítem 4.3.3 (5,0%) e os aqui encontrados

a partir da fixação de 4% de volume de vazios, foram de 0,46% para o ligante convencional e 0,56% para o ligante modificado.

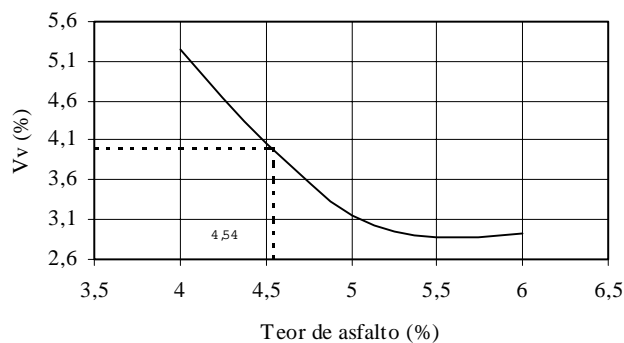


FIGURA 5.1 - Valores médios do volume de vazios calculados para todos os corpos-de-prova moldados com asfalto convencional.

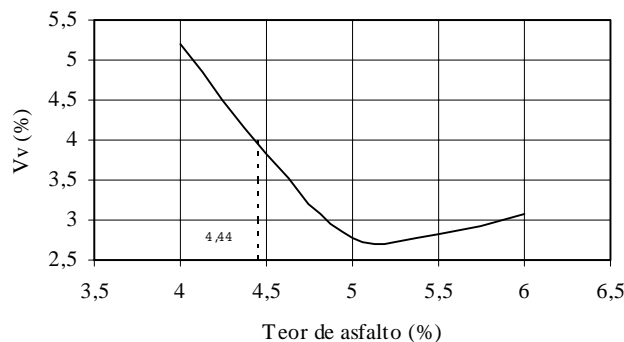


FIGURA 5.2 – Valores médios do volume de vazios calculados para todos os corpos-de-prova moldados com asfalto modificado.

Nas FIGURAS de 5.3 a 5.6 são apresentadas as curvas de variação das demais propriedades, densidade aparente e relação betume/vazios, para os dois tipos de asfalto utilizados. Nas FIGURAS 5.3 e 5.4 são apresentadas as curvas de variação das densidades aparentes das misturas em função dos teores de asfalto e pode-se notar que as

máximas densidades ocorrem para um teor de ligante igual a 4,9% para ambos os ligantes, indicando variações de 0,36% e 0,46% para os asfaltos convencional e modificado respectivamente, com relação ao teor encontrado quando da fixação em 4% para o volume de vazios. O valor encontrado para a densidade aparente para os dois tipos de ligantes foi de 2,366 para volume de vazios igual a 4%.

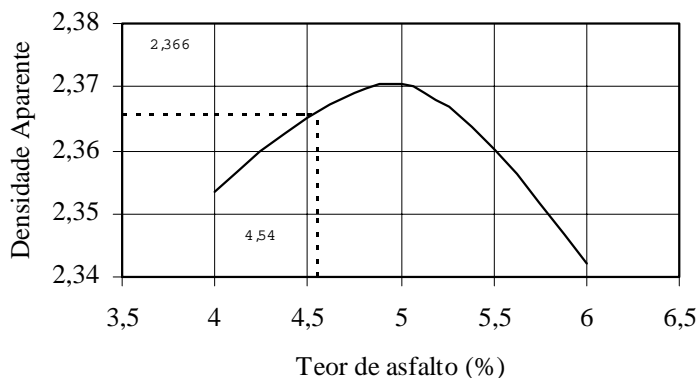


FIGURA 5.3 – Valores médios da densidade aparente para todos os corpos-de-prova moldados com asfalto convencional

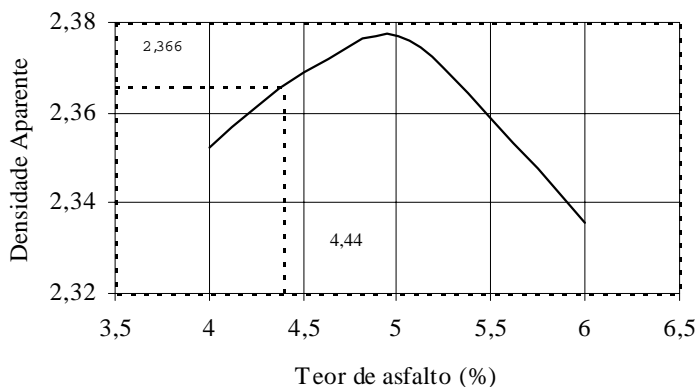


FIGURA 5.4 – Valores médios da densidade aparente para todos os corpos-de-prova moldados com asfalto modificado.

Nas FIGURAS 5.5 e 5.6 estão apresentadas as curvas de variação da relação betume/vazios em função dos teores de ligante, para as duas misturas. Nota-se que, para os respectivos teores ótimos, o valor da relação betume/vazios encontrado para os corpos-de-prova moldados com asfalto convencional (72,4%) é praticamente igual ao encontrado para os corpos-de-prova moldados com asfalto modificado (72,5%).

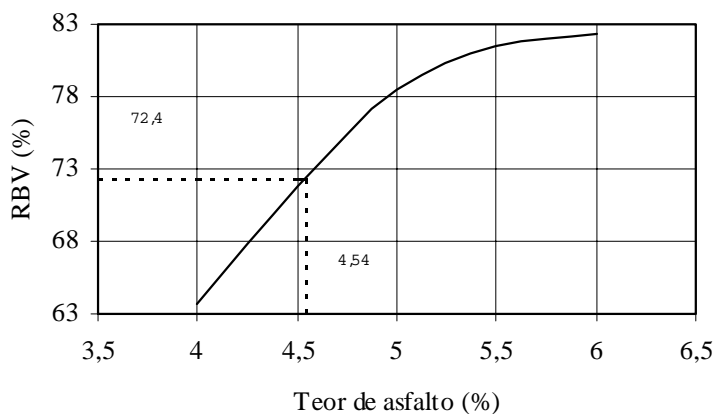


FIGURA 5.5 – Valores médios da relação betume/vazios para todos os corpos-de-prova moldados com asfalto convencional.

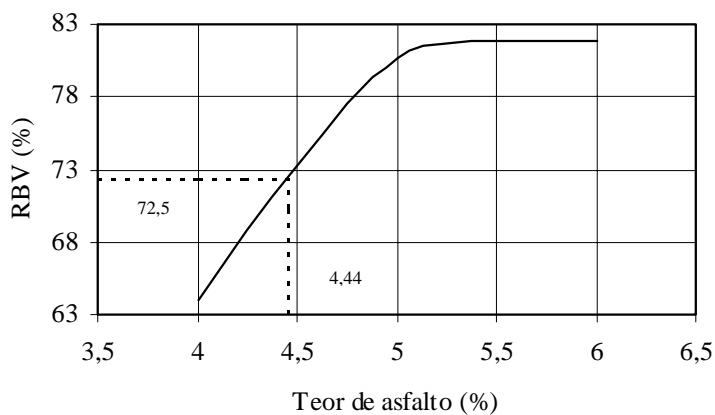


FIGURA 5.6 – Valores médios da relação betume/vazios para todos os corpos-de-prova moldados com asfalto modificado.

### 5.3 – ENSAIOS MARSHALL

As TABELAS 5.1 e 5.2 contêm os resultados médios obtidos nos ensaios Marshall para a densidade aparente (d), a densidade teórica (D), o volume de vazios (Vv), a relação betume/vazios (RBV), a estabilidade (E), a fluência (F) e a capacidade de suporte Marshall (CSM), das misturas com asfalto convencional (CAP-40) e com asfalto modificado (BETUFLEX B 65/60), respectivamente.

TABELA 5.1 – Resultados médios dos ensaios Marshall para as misturas com asfalto convencional

teor (%)	d	D	Vv (%)	RBV (%)	E (Kgf)	F (0,01")	CSM (Kgf/0,01")
4,0	2,342	2,484	5,726	61,361	705,432	13,000	55,068
4,5	2,366	2,466	4,045	71,909	883,610	13,333	66,394
5,0	2,370	2,448	3,181	78,405	821,427	14,333	57,599
5,5	2,351	2,430	3,268	79,343	509,600	17,667	28,911
6,0	2,345	2,413	2,818	82,943	780,416	20,000	39,021

TABELA 5.2 – Resultados médios dos ensaios Marshall para as misturas com asfalto modificado

teor (%)	d	D	Vv (%)	RBV (%)	E (Kgf)	F (0,01")	CSM (Kgf/0,01")
4,0	2,353	2,481	5,185	64,092	1111,231	13,667	81,222
4,5	2,367	2,463	3,905	72,849	1089,755	15,667	68,943
5,0	2,376	2,445	2,817	80,557	994,448	16,333	61,556
5,5	2,355	2,427	2,962	81,089	669,760	16,667	40,185
6,0	2,346	2,410	2,647	83,913	620,256	20,000	31,013

Nas FIGURAS de 5.7 a 5.12 estão apresentados os gráficos referentes à densidade aparente, à estabilidade, à fluência Marshall, ao volume de vazios, à relação betume/vazios e à capacidade de suporte Marshall para as misturas com asfalto convencional e modificado dos corpos-de-prova que foram submetidos ao ensaio Marshall.

Vê-se na FIGURA 5.7 que há uma diferença de apenas 0,1% entre os teores de asfalto que indicam os pontos máximos de densidade nas duas curvas em análise e que as misturas com polímero apresentaram densidades maiores que as com asfalto convencional, provavelmente por terem sido compactadas a temperaturas maiores.

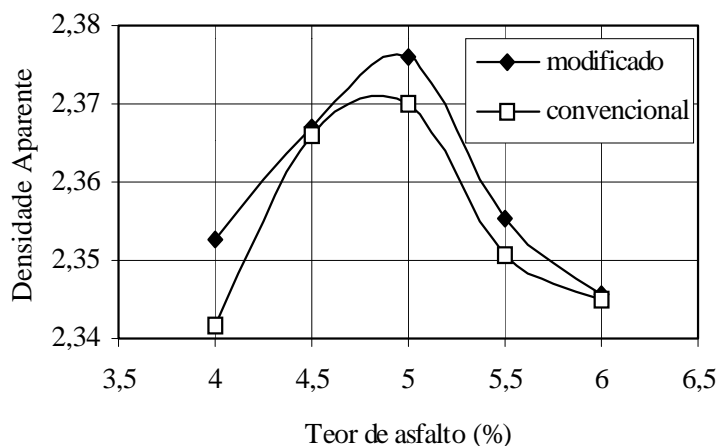


FIGURA 5.7 – Valores médios das densidades aparentes para as misturas com asfalto convencional e modificado.

Na FIGURA 5.8 é apresentado o gráfico com as variações das estabilidades Marshall para os dois tipos de misturas, onde nota-se que as com asfalto modificado apresentaram valores maiores para quase todos os teores de asfalto, com exceção do teor de 6,0%, onde o quadro inverteu-se. Pode-se concluir, provisoriamente, que a utilização do asfalto com polímero causa aumento do valor da estabilidade Marshall.

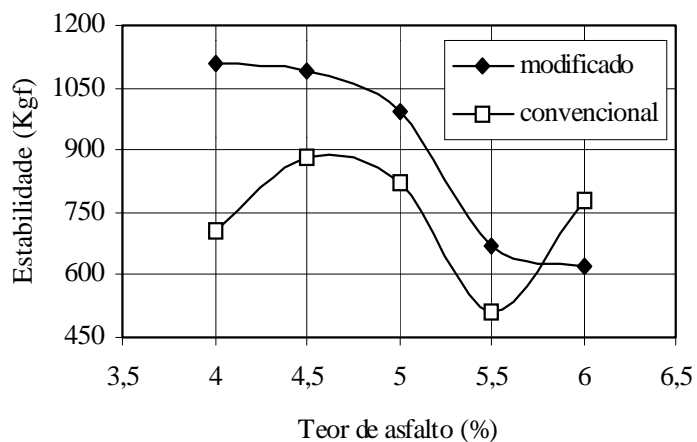


FIGURA 5.8 - Valores médios das estabilidades Marshall para as misturas moldadas com asfalto convencional e com asfalto modificado

Na FIGURA 5.9 são apresentadas as curvas das fluências Marshall para os dois tipos de ligantes. Observando-se essas curvas verifica-se que, para a maioria dos teores (4,0%; 4,5% e 5,0%), a fluência apresentou-se maior para o asfalto modificado, com inversão dessa situação para 5,5% de teor de ligante e, para 6,0% de ligante, onde os valores das fluências igualaram-se.

Na FIGURA 5.10 são apresentadas as curvas de variação dos volumes de vazios em função do teor de ligante. Nessa figura as curvas são decrescentes, com formas semelhantes e valores muito próximos, não acusando influência da presença de polímero nas misturas. Na FIGURA 5.11 são apresentadas as curvas de variação da relação betume/vazios em função do teor de ligante, notando-se que a tendência, nesse caso, é semelhante à encontrada para o volume de vazios.

As curvas da capacidade de suporte Marshall encontram-se apresentadas na FIGURA 5.12, onde pode-se ver que, em geral, são decrescentes com o teor de ligante, com as



misturas com asfalto modificado apresentando valores maiores para os teores de 4,0%; 4,5%; 5,0% e 5,5% e inferior para 6,0% de ligante.

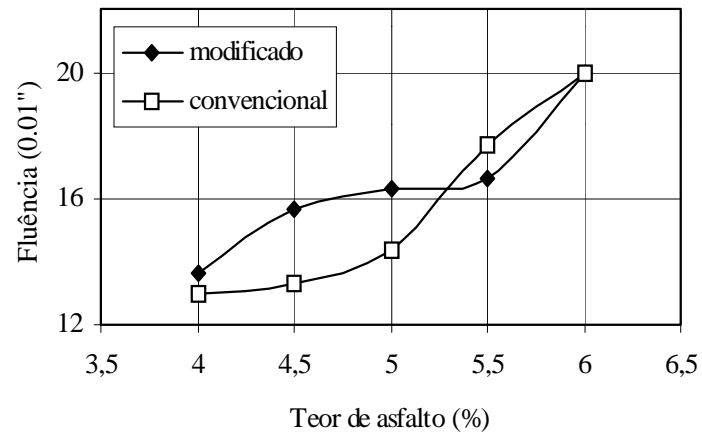


FIGURA 5.9 - Valores médios das fluências Marshall para as misturas moldadas com asfalto convencional e com asfalto modificado

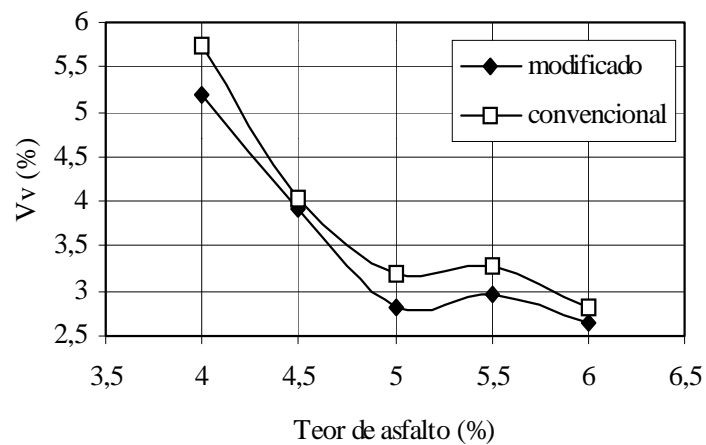


FIGURA 5.10 – Valores médios dos volumes de vazios para as misturas com asfalto convencional e asfalto modificado.

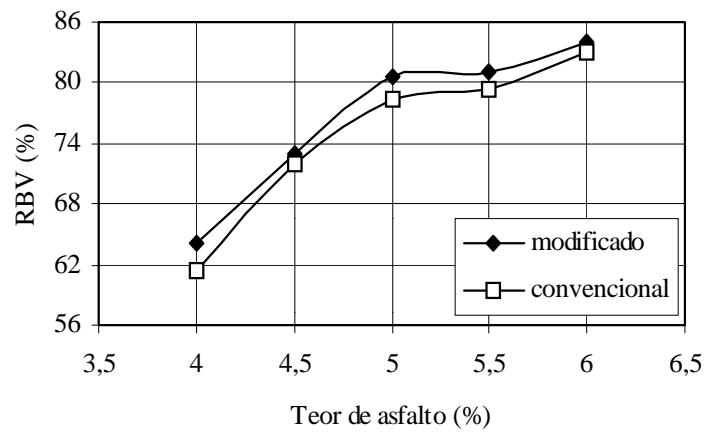


FIGURA 5.11 - Valores médios das relações betume/vazios para as misturas com asfalto convencional e com asfalto modificado.

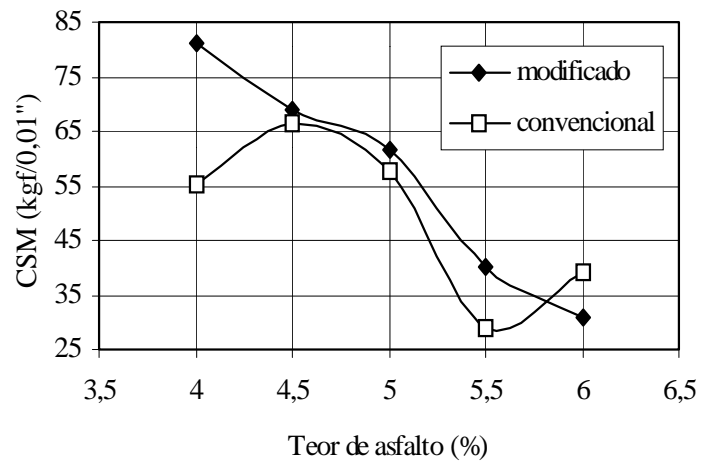


FIGURA 5.12 - Capacidade de suporte Marshall para as misturas com asfalto convencional e asfalto modificado.

#### 5.4 – ENSAIOS DE FLUÊNCIA POR COMPRESSÃO UNIAXIAL ESTÁTICA

Apresentam-se, a seguir, os resultados dos ensaios de fluência por compressão uniaxial estática, ou seja, as deformações elásticas (Def. EL), as deformações visco-plástica (Def. VP), as deformações totais (Def. T) e os módulos de fluência (MF). As características físicas dos corpos-de-prova usados nesses ensaios também são expostos, a saber, densidades aparentes (d), volumes de vazios (Vv) e relações betume/vazios (RBV). Nas TABELAS 5.3 e 5.4 apresentam-se, respectivamente, os resultados para as misturas com asfalto convencional (CAP-40) e para as misturas com asfalto modificado (BETUFLEX B 65/60).

TABELA 5.3 - Resultados médios dos ensaios de fluência estática para as misturas moldadas com asfalto convencional

teor	d	Vv (%)	RBV (%)	Def..T (%)	Def.V.P.(%)	Def.EL.(%)	M.F.(MPa)
4,0	2,364	4,815	65,679	0,175	0,057	0,118	57,64
4,5	2,360	4,283	70,690	0,198	0,078	0,12	50,89
5,0	2,376	2,952	79,624	0,386	0,204	0,182	26,75
5,5	2,367	2,593	82,995	0,626	0,414	0,212	17,53
6,0	2,348	2,681	83,623	0,790	0,498	0,292	12,93

TABELA 5.4 - Resultados médios dos ensaios de fluência estática para as misturas moldadas com asfalto modificado

teor	d	Vv (%)	RBV (%)	Def.T (%)	Def.V.P.(%)	Def.EL.(%)	M.F.(MPa)
4,0	2,358	4,962	65,102	0,260	0,127	0,133	38,63
4,5	2,365	3,994	72,339	0,300	0,163	0,137	33,48
5,0	2,376	2,827	80,477	0,487	0,316	0,171	20,57
5,5	2,359	2,810	81,909	0,528	0,331	0,197	20,04
6,0	2,328	3,404	80,123	0,949	0,687	0,262	10,59

As FIGURAS 5.13 a 5.15, mostram, respectivamente, os valores médios das densidades aparentes, dos volumes de vazios e das relações betume/vazios para as misturas com asfalto convencional e modificados.

Observando-se a FIGURA 5.13, que compara as densidades aparentes das duas misturas, verifica-se que há uma diferença de 0,2%, aproximadamente, entre os teores de asfalto que correspondem aos pontos máximos das duas curvas, que suas formas são semelhantes e que na maioria dos pontos a mistura com asfalto convencional apresenta densidades superiores aos da mistura modificada, diferente do que havia ocorrido com os corpos-de-prova utilizados nos ensaios Marshall.

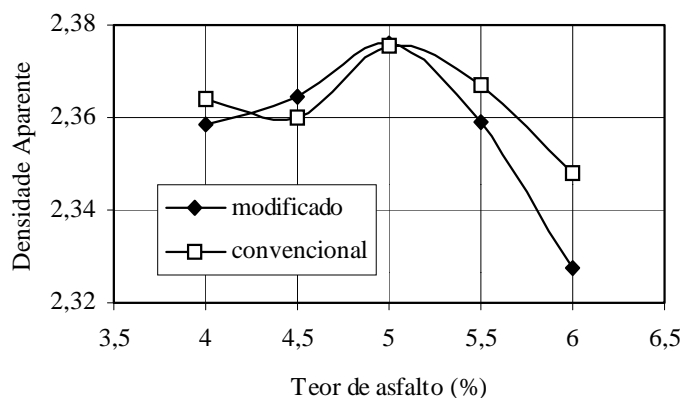


FIGURA 5.13 – Densidades aparentes médias dos corpos-de-prova usados nos ensaios de fluência por compressão uniaxial estática, para as misturas com asfalto convencional e modificado

A FIGURA 5.14 apresenta as curvas de variação dos volumes de vazios em função do teor de asfalto, para os dois tipos de asfaltos. Nota-se nessa figura que os volumes de vazios decrescem com o teor de asfalto e que as formas das curvas são semelhantes.

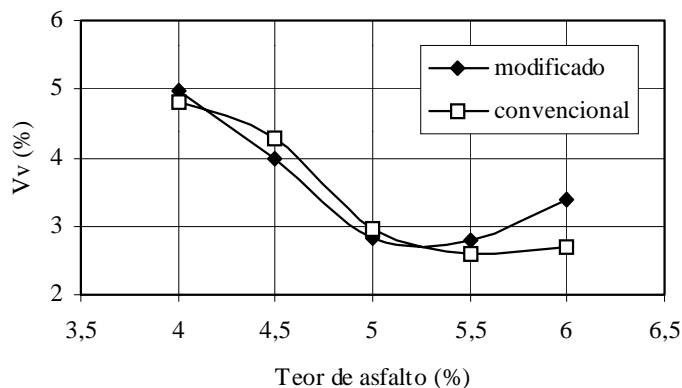


FIGURA 5.14 – Volumes de vazios médios dos corpos-de-prova usados nos ensaios de fluência por compressão uniaxial estática, para as misturas com asfaltos convencional e modificado

Na FIGURA 5.15 são apresentadas as curvas das relações betume/vazios, que possuem formas semelhantes e próximas entre si e são, em geral, crescentes com o teor de asfalto e não acusando a influência da presença de polímeros.

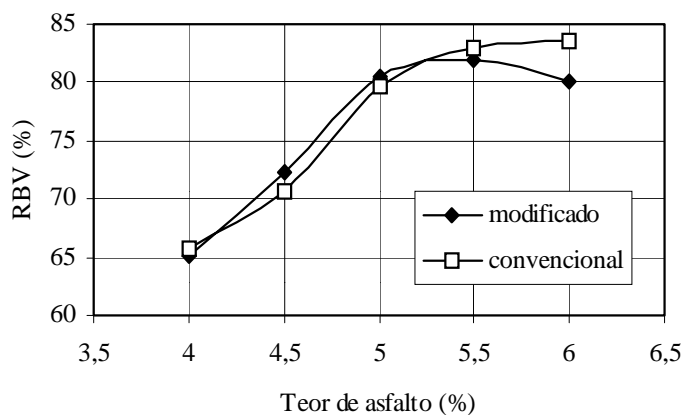


FIGURA 5.15 - Valores médios das relações betume/vazios nas misturas com asfalto convencional e com asfalto modificado

Nas FIGURAS 5.16 e 5.17 são apresentados, respectivamente, os valores médios das deformações totais e das deformações viscoplásticas versus os teores de asfalto empregados, para ambos os tipos de misturas.

Na FIGURA 5.16 as curvas apresentam-se crescentes com o teor de ligante e muito próximas entre si, mas com valores superiores de deformação total para as misturas que empregaram asfalto modificado, exceto para o teor de 5,5% de ligante.

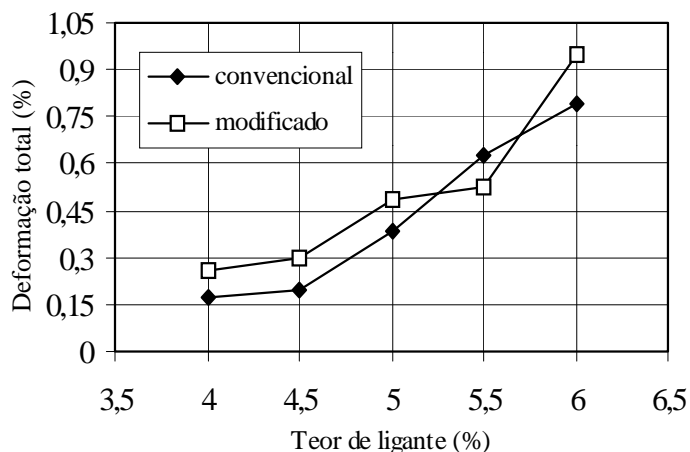


FIGURA 5.16 – Valores médios das deformações totais para misturas moldadas com asfalto convencional e com asfalto modificado

Na FIGURA 5.17 as curvas também apresentam-se crescentes com o teor de ligante, muito próximas entre si e com valores superiores de deformação viscoplástica para as misturas com asfalto modificado, exceto para o teor de 5,5% de ligante.

Na FIGURA 5.18 estão apresentados os valores das deformações elásticas para ambas as misturas estudadas, com curvas crescentes com o teor de ligante e deformações elásticas superiores para as misturas com asfalto convencional, nos teores de ligante iguais a 5,0%; 5,5% e 6,0%.

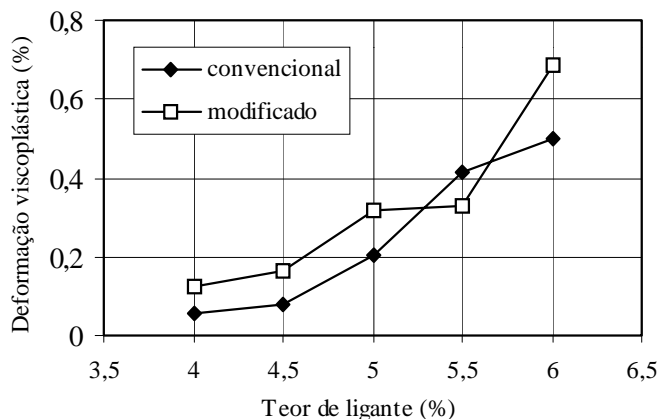


FIGURA 5.17 – Valores médios das deformações viscoplásticas para misturas moldadas com asfalto convencional e com asfalto modificado

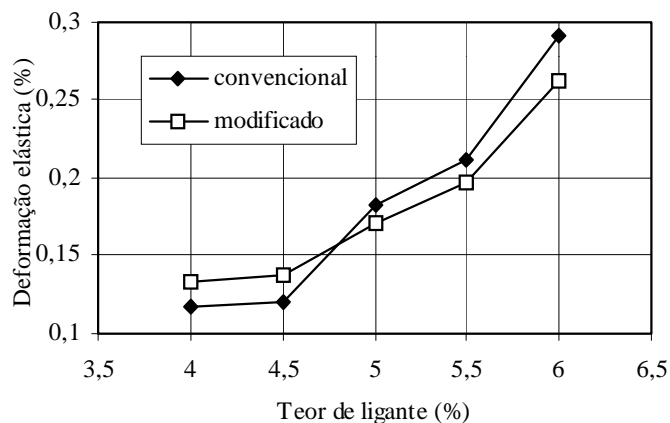


FIGURA 5.18 – Valores médios das deformações elásticas para misturas moldadas com asfalto convencional e com asfalto modificado

O gráfico da FIGURA 5.19 apresenta os valores médios dos módulos de fluência em função do teor de asfalto para as duas misturas estudadas, com curvas decrescentes com o teor de ligante e valores bem superiores para as misturas com asfalto convencional, exceto nos teores de 5,5% e 6,0% onde os valores são iguais para ambas as misturas.

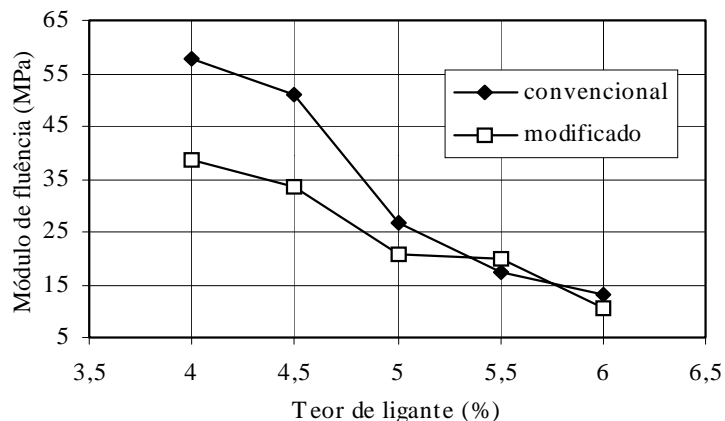


FIGURA 5.19 – Valores médios dos módulos de fluência para misturas moldadas com asfalto convencional e com asfalto modificado

FIGURAS 5.20 a 5.24 mostram, respectivamente, os valores médios das deformações axiais para misturas moldadas com teores de asfalto iguais a 4%; 4,5%; 5%; 5,5% e 6,0% em função do tempo de duração dos ensaios de fluência por compressão uniaxial estática, para os dois tipos de misturas estudadas.

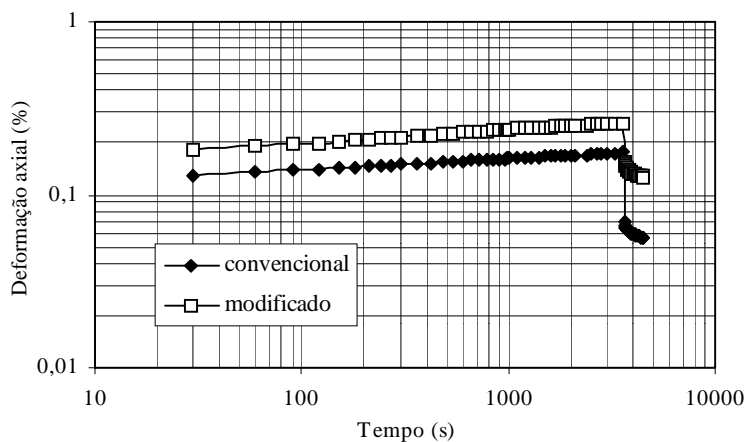


FIGURA 5.20 – Resultados médios da deformação axial para os ensaios de fluência estática para misturas com 4,0% de ligante



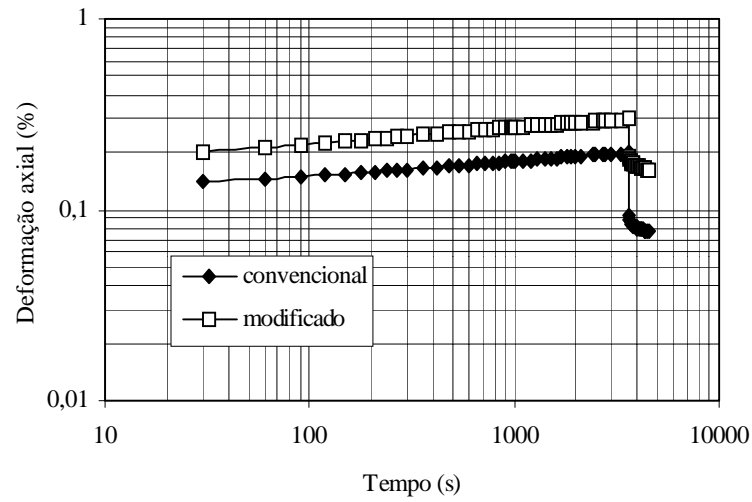


FIGURA 5.21 – Resultados médios da deformação axial para os ensaios de fluência estática para misturas com 4,5% de ligante

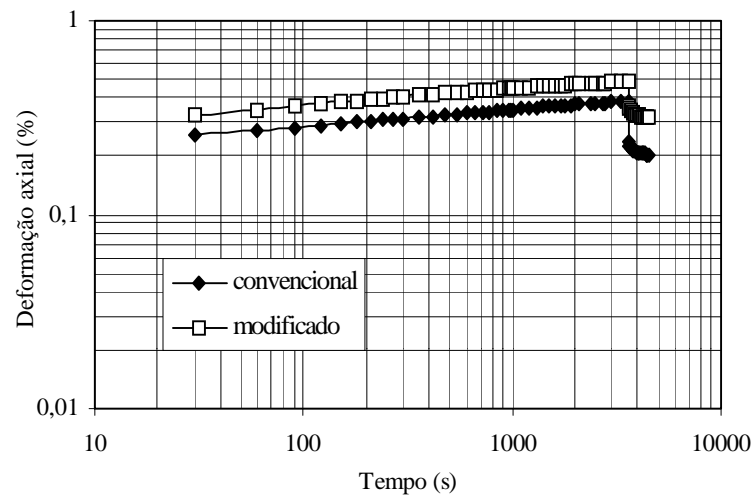


FIGURA 5.22 – Resultados médios da deformação axial para os ensaios de fluência estática para misturas com 5,0% de ligante

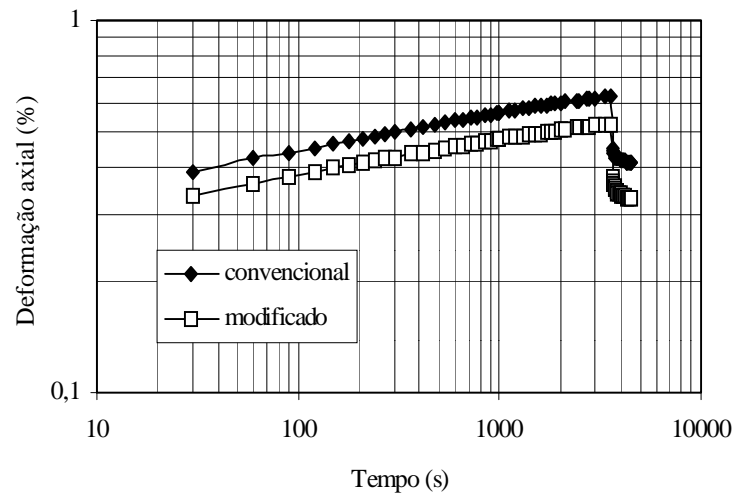


FIGURA 5.23 – Resultados médios da deformação axial para os ensaios de fluência estática para misturas com 5,5% de ligante

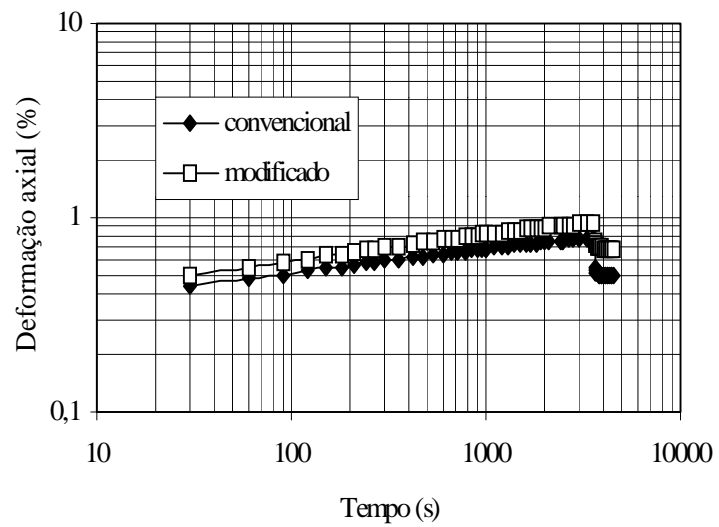


FIGURA 5.24 – Resultados médios da deformação axial para os ensaios de fluência estática para misturas com 6,0% de ligante.

Na TABELA 5.5 são apresentados os parâmetros “a” e “b” das curvas de fluência estática obtidos a partir da ajustagem de retas aos “trechos” com carregamento dos ensaios, para os dois tipos de misturas estudadas, em função do teor de ligante.

TABELA 5.5 – Parâmetros das curvas de fluência por compressão uniaxial estática

Teor de ligante (%)	Curva de fluência estática ( $y = a x + b$ )			
	Parâmetro “a”		Parâmetro “b”	
	Convencional	Modificado	Convencional	Modificado
4,0	1,00E-05	2,00E-05	0,1471	0,2109
4,5	1,00E-05	2,00E-05	0,1586	0,2369
5,0	3,00E-05	3,00E-05	0,3034	0,3957
5,5	5,00E-05	4,00E-05	0,4867	0,4163
6,0	8,00E-05	1,00E-04	0,5773	0,6731

Nas FIGURAS 5.25 e 5.26, os parâmetros “a” e “b” das curvas de fluência estática estão apresentadas graficamente em função do teor de asfalto, para os dois tipos de misturas. Nota-se que, de uma maneira geral, os parâmetros “a” (inclinação) e “b” (intercepto) são maiores para as misturas com asfalto modificado e que esses parâmetros crescem com o teor de asfalto das misturas, independente do tipo de asfalto utilizado.

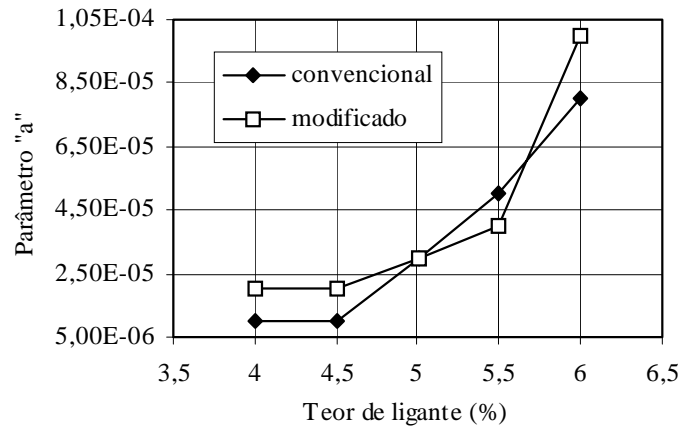


FIGURA 5.25 – Parâmetro “a” das curvas de fluência por compressão uniaxial estática

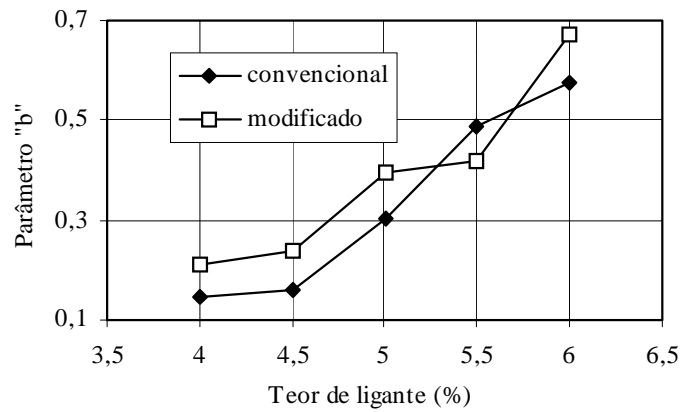


FIGURA 5.26 – Parâmetro “b” das curvas de fluência por compressão uniaxial estática

## 5.5 – ENSAIOS DE DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL

Nas TABELAS 5.6 e 5.7 estão apresentadas os resultados dos ensaios de resistência à tração por compressão diametral.

TABELA 5.6 – Resultados médios das resistências à tração por compressão diametral para as misturas moldadas com asfalto convencional

teor	d	Vv (%)	RBV (%)	$\sigma_t$ (Kgf/cm <sup>2</sup> )
4,0	2,334	6,044	59,991	8,742
4,5	2,354	4,538	69,403	9,869
5,0	2,363	3,466	76,827	9,818
5,5	2,359	2,918	81,211	8,783
6,0	2,346	2,761	83,224	6,819

TABELA 5.7 – Resultados médios das resistências à tração por compressão diametral para as misturas moldadas com asfalto modificado

teor	d	Vv (%)	RBV (%)	$\sigma_t$ (Kgf/cm <sup>2</sup> )
4,0	2,336	5,856	61,176	9,162
4,5	2,372	3,716	73,809	10,189
5,0	2,378	2,718	81,136	8,975
5,5	2,358	2,856	81,656	7,718
6,0	2,324	3,536	79,453	6,150

As FIGURAS 5.27 a 5.29 mostram, respectivamente, os valores médios das densidades aparentes, dos volumes de vazios e das relações betume/vazios para as misturas com

asfalto convencional e com asfalto modificado dos corpos-de-prova que foram submetidos aos ensaios de resistência à tração por compressão diametral.

Verifica-se na FIGURA 5.27 que os valores absolutos das densidades aparentes para as misturas modificadas são quase sempre maiores, devido provavelmente à temperatura de moldagem ser mais alta na compactação. Nota-se também que há uma diferença de 0,6% entre os dois pontos máximos das duas curvas.

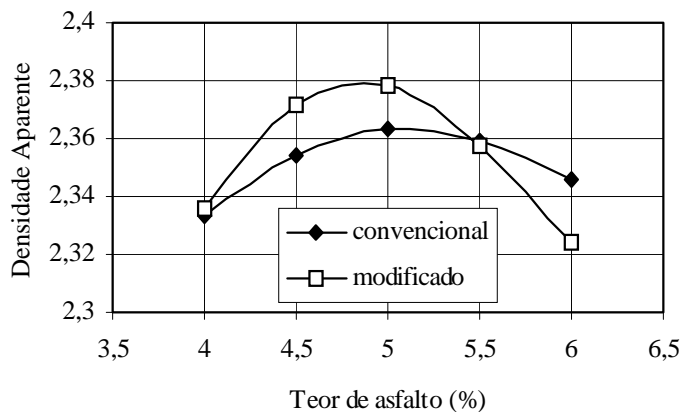


FIGURA 5.27 – Densidades aparentes médias dos corpos-de-prova usados na determinação da resistência à tração por compressão diametral para as duas misturas com asfaltos convencional e modificado

Na FIGURA 5.28 apresentam-se as curvas de volume de vazios em função do teor de asfalto, que são, em geral, decrescentes e com valores maiores para as misturas com asfalto convencional; já nas curvas das relações betume/vazios, apresentadas na FIGURA 5.29, as misturas com asfalto modificado exibem valores maiores que os das misturas com asfalto convencional, com exceção do teor de ligante igual a 6,0%.

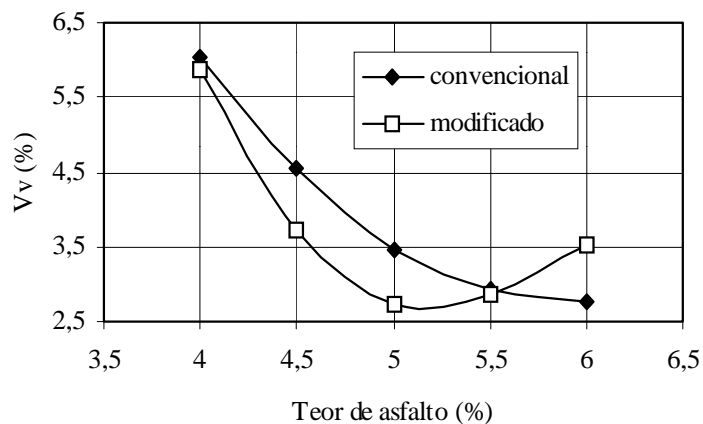


FIGURA 5.28 – Valores médios do volume de vazios dos corpos-de-prova utilizados na determinação da resistência à tração

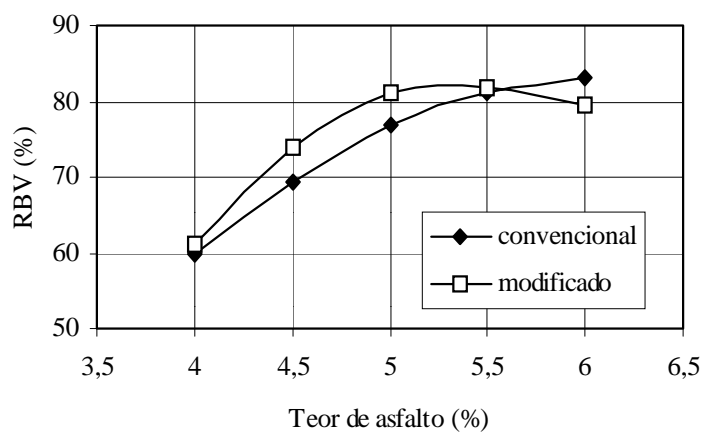


FIGURA 5.29 – Valores médios da relação betume/vazios dos corpos-de-prova utilizados na determinação da resistência à tração

O gráfico da FIGURA 5.30 mostra os valores médios da resistência à tração ( $\sigma_t$ ) em função do teor de asfalto, para as duas misturas estudadas nesta pesquisa. Nota-se que a curva de resistência à tração para a mistura com asfalto modificado tem seu ponto

máximo superior ao ponto máximo da curva de resistência à tração para a mistura com asfalto convencional.

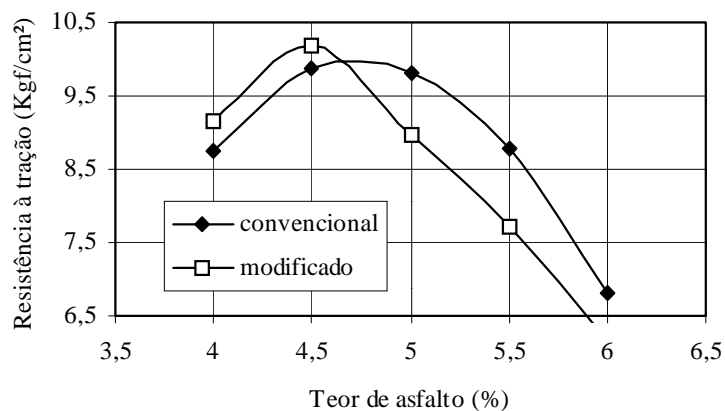


FIGURA 5.30 – Valores médios da resistência à tração para misturas com asfaltos convencional e modificado

## 5.6 – ENSAIOS DE DETERMINAÇÃO DO MÓDULO DE RESILIÊNCIA POR COMPRESSÃO DIAMETRAL

Nas TABELAS 5.8 e 5.9 estão apresentados os resultados dos ensaios de módulo de resiliência por compressão diametral. Nota-se que as relações  $MR/\sigma_t$  são menores que as recomendadas nas expressões 3.7, 3.8 e 3.10 do capítulo 3.

TABELA 5.8 – Resultados médios dos ensaios de módulo de resiliência por compressão diametral para as misturas com asfalto convencional

teor	d	Vv (%)	RBV (%)	MR (MPa)	$MR/\sigma_t$
4,0	2,350	5,376	62,942	2412,90	2760,12
4,5	2,374	3,699	73,720	2610,94	2645,60
5,0	2,375	2,986	79,432	1824,13	1857,94
5,5	2,359	2,910	81,241	1550,48	1765,32
6,0	2,332	3,350	80,225	*	*

\* Os ensaios não puderam ser realizados face as condições de contorno dos corpos-de-prova estarem fora dos padrões normalizados.



TABELA 5.9 – Resultados médios dos ensaios de módulo de resiliência por compressão diametral para as misturas com asfalto modificado

teor	d	Vv (%)	RBV (%)	MR(MPa)	MR/ $\sigma_t$
4,0	2,356	5,036	64,774	1748,00	1907,88
4,5	2,369	3,817	73,290	1478,10	1450,68
5,0	2,377	2,783	80,730	1444,46	1609,43
5,5	2,366	2,508	83,621	1194,79	1548,06
6,0	2,336	3,061	81,799	*	*

\* Os ensaios não puderam ser realizados face as condições de contorno dos corpos-de-prova estarem fora dos padrões normalizados.

As FIGURAS 5.31 a 5.33 apresentam, respectivamente, os gráficos com os valores médios das densidades aparentes, dos volumes de vazios e das relações betume/vazios para as misturas com asfaltos convencional e modificado, dos corpos-de-prova que foram submetidos aos ensaios de módulo de resiliência.

O gráfico da FIGURA 5.31 apresenta uma diferença de 0,6% no teor de asfalto que corresponde aos pontos de máximo das curvas de densidade aparente, sendo suas formas muito semelhantes e seus valores muito próximos.

As curvas de volume de vazios apresentadas na FIGURA 5.32 são, em geral, decrescentes com o aumento do teor de ligante, apresentando valores muito próximos e formas muito semelhantes.

As curvas de relação betume/vazios mostradas na FIGURA 5.33 apresentam formas semelhantes, muito próximas em seus valores e crescentes com aumento do teor de ligante.

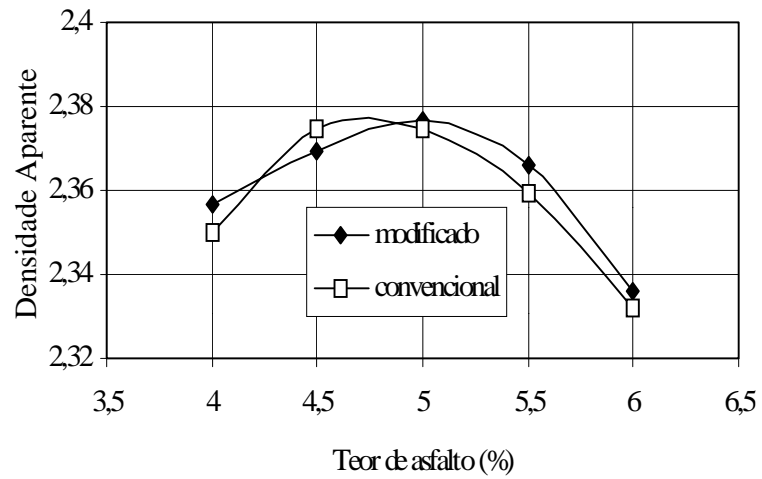


FIGURA 5.31 – Valores médios das densidades aparentes dos corpos-de-prova utilizados nos ensaios de determinação do módulo de resiliência

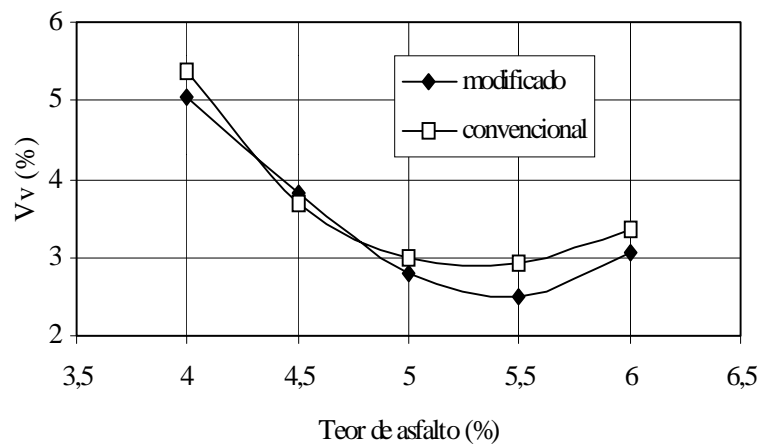


FIGURA 5.32 – Valores médios dos volumes de vazios dos corpos-de-prova utilizados nos ensaios de determinação do módulo de resiliência

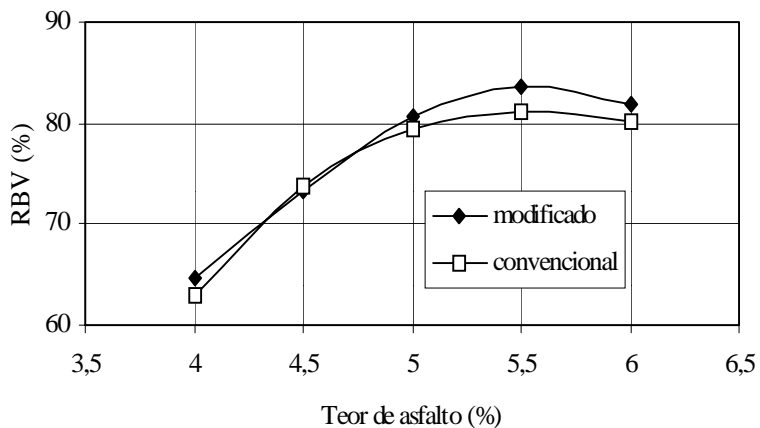


FIGURA 5.33 – Valores médios das relações betume/vazios dos corpos-de-prova utilizados nos ensaios de determinação do módulo de resiliência

A FIGURA 5.34 apresenta os valores médios dos módulos de resiliência por compressão diametral versus os teores de asfalto empregados, para ambas as misturas estudadas. Nota-se que os valores do módulo de resiliência para as misturas com asfalto convencional foram bem maiores aos das misturas com asfalto modificado.

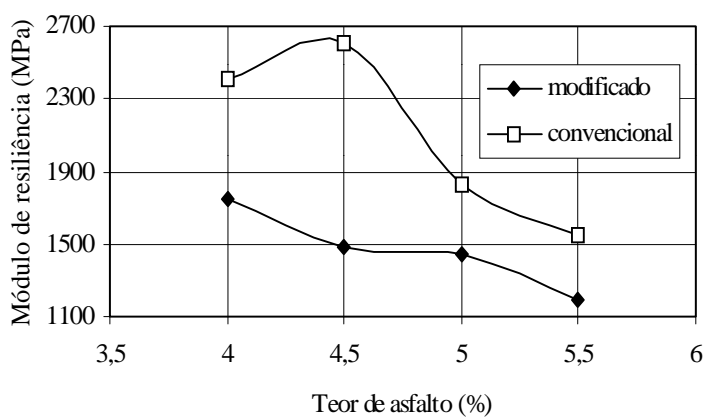


FIGURA 5.34 – Valores médios dos módulos de resiliência por compressão diametral para misturas moldadas com asfaltos convencional e modificado

## 5.7 – ANÁLISE ESTATÍSTICA

Apresentam-se a seguir uma análise estatística dos resultados dos ensaios Marshall, fluência por compressão uniaxial estática, resistência à tração por compressão diametral e módulo de resiliência por compressão diametral.

Nas TABELAS 5.10 a 5.15 constam os resultados estatísticos dos resultados do ensaio Marshall. Nota-se que as propriedades densidade aparente e relação betume/vazios tiveram uma dispersão pequena, menor que 5%. As propriedades volume de vazios e fluência Marshall já tiveram um coeficiente de variação um pouco maior que as anteriores, em torno de 10%. A estabilidade Marshall e a capacidade de suporte Marshall tiveram uma dispersão de 4% a 30% em seus resultados.

TABELA 5.10 – Média, desvio padrão e coeficiente de variação das densidades aparentes para todos os corpos-de-prova

PARÂMETROS ESTATÍSTICOS	% ASFALTO CONVENCIONAL					% ASFALTO MODIFICADO				
	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0
Média	2,353	2,365	2,371	2,360	2,342	2,352	2,369	2,377	2,359	2,336
Desvio padrão	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
Coeficiente de variação (%)	0,53	0,40	0,39	0,32	0,39	0,64	0,39	0,25	0,27	0,48

TABELA 5.11 – Média, desvio padrão e coeficiente de variação dos volumes de vazios para todos os corpos-de-prova

PARÂMETROS ESTATÍSTICOS	% ASFALTO CONVENCIONAL					% ASFALTO MODIFICADO				
	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0
Média	5,249	4,071	3,154	2,881	2,935	5,212	3,828	2,785	2,814	3,067
Desvio padrão	0,51	0,39	0,38	0,31	0,38	0,6	0,38	0,24	0,26	0,47
Coeficiente de variação (%)	9,65	9,48	12,03	10,91	12,79	11,58	9,87	8,76	9,38	15,25

TABELA 5.12 – Média, desvio padrão e coeficiente de variação das relações betume/vazios para todos os corpos-de-prova

PARÂMETROS ESTATÍSTICOS	% ASFALTO CONVENCIONAL					% ASFALTO MODIFICADO				
	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0
Média	63,59	71,78	78,53	81,42	82,33	63,99	73,23	80,73	81,90	81,80
Desvio padrão	2,41	1,98	2,06	1,71	1,93	2,73	2,01	1,40	1,46	2,34
Coeficiente de variação (%)	3,79	2,75	2,62	2,10	2,34	4,27	2,75	1,73	1,78	2,86

TABELA 5.13 – Média, desvio padrão e coeficiente de variação das estabilidades Marshall

PARÂMETROS ESTATÍSTICOS	% ASFALTO CONVENCIONAL					% ASFALTO MODIFICADO				
	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0
Média	705,4	883,6	821,4	509,6	780,4	1111	1089	994,1	669,7	620,3
Desvio padrão	114,3	76,6	35,4	36,4	240,9	107,9	248,7	123,3	67,72	32,98
Coeficiente de variação (%)	16,20	8,67	4,30	7,14	30,87	9,71	22,82	12,40	10,11	5,32

TABELA 5.14 – Média, desvio padrão e coeficiente de variação das fluências Marshall

PARÂMETROS ESTATÍSTICOS	% ASFALTO CONVENCIONAL					% ASFALTO MODIFICADO				
	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0
Média	13,00	13,33	14,33	17,67	20	13,67	15,67	16,33	16,67	20,00
Desvio padrão	1,41	0,58	1,15	0,58	0	0,58	1,53	1,53	0,58	0
Coeficiente de variação (%)	10,88	4,33	8,06	3,27	0	4,22	9,75	9,35	3,46	0

TABELA 5.15 – Média, desvio padrão e coeficiente de variação das capacidades de suporte Marshall

PARÂMETROS ESTATÍSTICOS	% ASFALTO CONVENCIONAL					% ASFALTO MODIFICADO				
	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0
Média	55,07	66,39	57,60	28,91	39,02	81,22	68,94	61,56	40,19	31,01
Desvio padrão	14,78	7,11	5,88	3,04	12,05	5,4	9,5	12,47	3,73	1,65
Coeficiente de variação (%)	26,84	10,72	10,2	10,51	30,87	6,64	13,78	20,26	9,27	5,32

As TABELAS 5.16 a 5.20 apresentam os resultados estatísticos para as propriedades medidas nos ensaios de fluência por compressão uniaxial estática. A deformação viscoplástica e o módulo de fluência apresentaram dispersões altas, ultrapassando, em alguns casos, 40%. A deformação elástica teve dispersão em torno de 10% e a deformação total teve dispersão variável de 5% a 26%.

TABELA 5.16 – Média, desvio padrão e coeficiente de variação das deformações totais

PARÂMETROS ESTATÍSTICOS	% ASFALTO CONVENCIONAL					% ASFALTO MODIFICADO				
	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0
Média	0,175	0,198	0,386	0,626	0,790	0,260	0,300	0,487	0,528	0,949
Desvio padrão	0,02	0,02	0,08	0,17	0,11	0,02	0,02	0,03	0,12	0,07
Coeficiente de variação (%)	10,09	10,86	22,03	26,89	13,67	7,72	7,22	5,57	22,98	7,03

TABELA 5.17 – Média, desvio padrão e coeficiente de variação das deformações viscoplásticas

PARÂMETROS ESTATÍSTICOS	% ASFALTO CONVENCIONAL					% ASFALTO MODIFICADO				
	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0
Média	0,057	0,078	0,204	0,414	0,498	0,127	0,163	0,316	0,331	0,687
Desvio padrão	0,03	0,01	0,08	0,17	0,09	0,02	0,02	0,02	0,13	0,08
Coeficiente de variação (%)	49,12	13,77	37,17	40,37	17,50	13,75	13,87	7,61	38,34	11,20

TABELA 5.18 – Média, desvio padrão e coeficiente de variação das deformações elásticas

PARÂMETROS ESTATÍSTICOS	% ASFALTO CONVENCIONAL					% ASFALTO MODIFICADO				
	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0
Média	0,118	0,120	0,182	0,212	0,292	0,133	0,137	0,171	0,197	0,262
Desvio padrão	0,02	0,01	0,01	0,01	0,03	0,003	0,002	0,01	0,01	0,01
Coeficiente de variação (%)	13,55	9,13	4,97	4,11	11,63	2,18	1,26	8,42	3,36	3,89

TABELA 5.19 – Média, desvio padrão e coeficiente de variação dos módulos de fluência

PARÂMETROS ESTATÍSTICOS	% ASFALTO CONVENCIONAL					% ASFALTO MODIFICADO				
	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0
Média	57,64	50,89	26,75	17,53	12,93	38,63	33,48	20,57	20,04	10,59
Desvio padrão	5,53	5,88	5,68	5,81	1,96	2,97	2,50	1,19	4,78	0,76
Coeficiente de variação (%)	9,60	11,55	21,23	33,13	15,12	7,70	7,48	5,77	23,86	7,16

Na TABELA 5.20 pode-se constatar que os coeficientes de variação dos resultados dos ensaios de resistência à tração por compressão diametral variaram entre 10% e 25%.

TABELA 5.20 – Média, desvio padrão e coeficiente de variação das resistências à tração por compressão diametral

PARÂMETROS ESTATÍSTICOS	% ASFALTO CONVENCIONAL					% ASFALTO MODIFICADO				
	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0
Média	8,742	9,869	9,818	8,783	6,819	9,162	10,19	8,975	7,718	6,150
Desvio padrão	(1)	0,89	0,82	1,23	0,95	0,8	1,38	2,21	0,81	0,68
Coeficiente de variação (%)	(1)	8,99	8,32	14,02	13,94	8,72	13,54	24,58	10,55	10,99

<sup>(1)</sup> Somente um corpo-de-prova para ensaiar.

Na TABELA 5.21 estão dispostos os resultados estatísticos do módulo de resiliência por compressão diametral, cuja dispersão variou de 7% a 26%.

TABELA 5.21 – Média, desvio padrão e coeficiente de variação dos módulos de resiliência por compressão diametral

PARÂMETROS ESTATÍSTICOS	% ASFALTO CONVENCIONAL					% ASFALTO MODIFICADO				
	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0
Média	2412	2610	1824	1550	(2)	1748	1478	1444	1194	(2)
Desvio padrão	191,2	207,1	228,5	338,3	(2)	131,1	384,3	251,8	272,8	(2)
Coeficiente de variação (%)	7,93	7,93	12,52	21,82	(2)	7,5	26,0	17,43	22,83	(2)

<sup>(2)</sup> Face as condições de contorno dos corpos-de-prova estarem fora de norma não foram realizados os ensaios.



## **CAPÍTULO 6**

### **CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES**

---

#### **6.1 – INTRODUÇÃO**

Neste capítulo são expostas considerações adicionais a respeito dos resultados dos ensaios assim como as possíveis conclusões acerca do programa experimental realizado.

#### **6.2 - ENSAIO MARSHALL**

- a) Os valores das densidades aparentes e das relações betume/vazios foram maiores para as misturas com asfalto modificado;
- b) Os valores dos volumes de vazios foram muito parecidos para os dois tipos de mistura, com valores ligeiramente maiores para as misturas com asfalto convencional;
- c) Para a fluência, as misturas com asfalto modificado apresentaram valores maiores para os três primeiros teores de ligante (4,0%, 4,5% e 5,0%), com inversão dessa situação para os outros teores (maiores) de ligante;

- d) Os valores das estabilidades foram consideravelmente maiores para as misturas com asfalto modificado, exceto para o teor de 6,0% de ligante;
- e) As capacidades de suporte Marshall apresentaram valores semelhantes para os teores intermediários (4,5%, 5,0% e 5,5%) dos dois tipos de mistura, com resultados um pouco melhores para as misturas com asfalto modificado. Para o teor de 4,0% de ligante os resultados foram superiores para as misturas com asfalto modificado, com inversão da situação para o teor de 6,0% de ligante;
- f) Em termos de dispersão, as densidades apresentaram os menores coeficientes de variação, em torno de 0,5%, e as estabilidades apresentaram os maiores valores que, em alguns casos, chegaram a mais de 30,0%. As demais propriedades apresentaram coeficientes de variação entre 5,0 e 15,0%.

### **6.3 – ENSAIO DE FLUÊNCIA POR COMPRESSÃO UNIAXIAL ESTÁTICA**

- a) As deformações (total, viscoplástica e elástica) apresentaram-se crescentes com o aumento do teor de ligante, para ambos os tipos de asfaltos;
- b) As deformações totais foram maiores em quatro dos teores de ligante (4,0%, 4,5%, 5,0% e 6,0%) para as misturas com asfalto modificado;
- c) As deformações viscoplásticas foram maiores para as misturas com asfalto modificado, com exceção do teor de 5,5% de ligante;
- d) As deformações elásticas foram menores em três dos teores de ligante (5,0%, 5,5% e 6,0%) para as misturas com asfalto modificado;

- e) Os módulos de fluência foram bem superiores para as misturas com asfalto convencional nos três primeiros teores de ligante, sendo que nos dois últimos teores (5,5% e 6,0%) os valores foram muito próximos para os dois tipos de misturas;
- f) Nos resultados dos ensaios de fluência por compressão uniaxial estática das misturas com asfalto convencional, houve dispersão significativa (coeficiente de variação maior que 20%) para as deformações total e viscoplástica e módulos de fluência. Quanto às deformações elásticas, as duas misturas apresentaram coeficientes de variação médios em torno de 10%.

#### **6.4 – ENSAIO DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL**

- a) As misturas com asfalto modificado apresentaram resistências à tração maiores, para mesmos teores de asfalto;
- b) As dispersões dos resultados deste ensaio, para ambas as misturas, foram médias, com coeficientes de variação em torno de 10%.

#### **6.5 - ENSAIO DE MÓDULO DE RESILIÊNCIA POR COMPRESSÃO DIAMETRAL**

- a) Os resultados deste ensaio foram maiores para as misturas com asfalto convencional, considerando-se mesmos teores de asfalto;
- b) As misturas com asfalto modificado apresentaram coeficientes de variação dos módulos de resiliência significativos, em torno de 20%.

## 6.6 - CONCLUSÃO GERAL

- a) À luz dos ensaios Marshall detectou-se, de um modo geral, um desempenho superior das misturas com asfalto modificado, principalmente nos resultados da estabilidade;
- b) À luz dos ensaios de fluência por compressão uniaxial estática, as misturas com asfalto modificado apresentaram melhor desempenho quanto à deformação elástica nos três maiores teores de ligante, entretanto as misturas com asfalto convencional apresentaram melhor desempenho nas deformações total e viscoplástica e no módulo de fluência;
- c) À luz dos ensaios de resistência à tração por compressão diametral, as misturas com asfalto modificado foram melhores;
- d) À luz dos ensaios de módulo de resiliência por compressão diametral à 25°C, as misturas com asfalto convencional apresentaram valores maiores entretanto, as relações  $MR/\sigma_t$  encontradas para ambas as misturas sugerem, a princípio, um (provável) melhor comportamento para as misturas com asfalto modificado;
- e) Todos os ensaios detectaram de uma forma ou de outra a diferença entre os asfaltos (ou presença do polímero);
- f) Analisando-se os resultados dos ensaios de fluência por compressão uniaxial estática, no que tange às deformações total e viscoplástica pode-se crer, a princípio, que não há vantagem em se utilizar misturas densas com asfaltos modificados por polímeros com seixo rolado como agregado graúdo. Porém, quando considera-se a *performance* superior destas mesmas misturas nos ensaios Marshall, nos ensaios de resistência à tração por compressão diametral, bem como em três dos cinco teores de ligante estudados das deformações elásticas nos ensaios de fluência compressão uniaxial estática, além das relações  $MR/\sigma_t$  encontradas sugerirem um provável

melhor comportamento para as misturas modificadas, não pode-se descartar de imediato o seu uso, devendo-se verificar seu desempenho variando-se a temperatura destes ensaios, bem como utilizá-las em ensaios dinâmicos como o de fluência por compressão uniaxial dinâmica ou ainda em simuladores de tráfego, tendo em vista esses ensaios simularem melhor o que ocorre nas pistas.

### **6.7 – RECOMENDAÇÕES PARA PESQUISAS FUTURAS**

- a) Analisar os efeitos na susceptibilidade térmica destas misturas com a variação da temperatura no ensaio de módulo de resiliência por compressão diametral;
- b) Utilizar ensaios dinâmicos para a análise da resistência à deformação permanente;
- c) Avaliar estatisticamente a repetibilidade dos parâmetros obtidos dos ensaios.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT (1961) *NBR 6473/96* – Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro. Cal virgem e cal hidratada - análise química. 3p.
- ABNT (1982) *NBR 7208* – Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro. Materiais betuminosos para pavimentação - terminologia. 2p.
- ABNT (1993) *NBR 12891* – Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro. Dosagem de misturas betuminosas pelo método Marshall. 12 p.
- AGLAN, H.; OTHMAN, A; FIGUEROA, L.; ROLLINGS, R. (1993). Effect of styrene-butadiene-styrene block copolymer on fatigue crack propagation behavior of asphalt concrete mixtures. *Transportation Research Record 1417*, p.178-186.
- AL-SUHAIBANI, A .; MUDAIHEEM, J.; ALFOZAN, F. (1992). Effect of filler type and content on properties of asphalt concrete mixes. *Effects of aggregates and mineral fillers on asphalt mixtures performance, American Society for Testing and Materials, ASTM STP 1147*, p.107-130.
- ASPHALT HANDBOOK (1947). Asphalt Institute Building, University of Maryland.
- BALBO, J.T. (1997). Pavimentos asfálticos: patologias e manutenção. Editora Plêiade. 103p.
- BERNUCCI, L.B.; CERATTI, J.AP.; CHAVES, J.M.; MOURA, E.; CARVALHO, A D. (1999). Estudo da adesividade no comportamento de misturas asfálticas. *10º Congresso Ibero-Latinoamericano Del Asfalto. Espanha. Seção B*, p.383-396
- BOULDIN, M.G.; COLLINS, J.H.(1992). Influence of binder rheology on rut resistance of polymer modified and unmodified hot mix asphalt. *Polymer Modified Asphalt binders, American Society for Testing and Materials, ASTM STP 1108*, p.50-60.
- BRÛLÉ, B. (1996). Polymer-modified asphalt cements used in the road construction industry: basic principles. *Transportation Research Record 1535*, p. 48-53.
- CARPENTER, S.H.; VANDAM, T. (1987). Laboratory performance comparisons of polymer-modified and unmodified asphalt concrete mixtures. *Transportation Research Record 1115*, p.62-74.
- CERATTI, J.A; RUWER,P.M.; OLIVEIRA, J.A (1996). Estudo do comportamento mecânico de concreto asfáltico com ligante modificado com polímero. *13º Encontro*

*de Asfalto, v.1, p.290-303.*

- COELHO, V. (1992). Um estudo sobre a dosagem pelo Método Marshall, de misturas asfálticas preparadas a quente. São Carlos, 203 p.. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- COELHO, V. (1994) Considerações sobre deformações permanentes em camadas asfálticas de pavimentação. *12º Encontro de Asfalto. p.179-194.*
- COELHO, V.; SÓRIA, M.H.A .(1995). Efeito da composição granulométrica e da temperatura na formação de trilhas-de-rodas em pavimentos flexíveis. *IX ANPET-Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes. V.1, pp. 93-100.*
- COELHO, V. (1996). Contribuição ao estudo das deformações permanentes, nas condições do Brasil, em camadas de concreto asfáltico de pavimentação. São Carlos, 281p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- CONSTANTINO, R.S.; LEITE, C.F.M.; GONÇALVES, M.L.A . (1998). Avaliação da faixa de plasticidade e da viscoelasticidade de asfaltos modificados com polímero. *14º Encontro de Asfalto. P.60-70.*
- CORTÉ, J.F.; BROSSEAUD, Y.; SIMONCELLI, J.P.; CAROFF, G. (1994). Investigation of rutting of asphalt surface layers: influence of binder and axle loading configuration. *Transportation Research Record 1436, p.28-37.*
- DE SENÇO, W.(1997). Manual de Técnicas de pavimentação. Editora PINI Ltda. 746p.
- DER – DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM DO ESTADO DE SÃO PAULO. M 148-60, Dosagem de misturas betuminosas pelo método da superfície específica. 7 p.
- DNC – DEPARTAMENTO NACIONAL DE COMBUSTÍVEIS. Regulamento técnico DNC N°01/92, revisão 02. 2 p.
- DNER –Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. 2º Distrito Rodoviário Federal, SAADY,E.N. (1999). Informações referentes ao revestimento asfáltico, tipo concreto betuminoso usinado a quente, utilizado em algumas rodovias pavimentadas do Estado do Pará. Ofício S/N°. 24 junho 1999.
- DNER –Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (1995). Especificação de

- material DNER-EM 204/95, Cimentos asfálticos do petróleo. 7 p.
- DNER –Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (1995). Especificação de material DNER-EM 036/95, Recebimento e aceitação de cimento Portland comum e Portland de alto forno. 10 p.
- DNER –Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (1997). Especificação de material DNER-EM 37/97, Agregado graúdo para concreto de cimento. 6 p.
- DNER –Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (1997). Especificação de material DNER-EM 38/97, Agregado miúdo para concreto de cimento. 5 p.
- DNER –Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (1997). Especificação de material DNER-EM 367/97, Material de enchimento para misturas betuminosas. 3 p.
- DNER –Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (1999). Especificação de material DNER-EM 396/99, Cimento asfáltico modificado por polímero. 4 p.
- DNER –Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (1997). Especificação de serviço DNER-ES 313/97, Pavimentação – Concreto betuminoso – Norma Rodoviária. Rio de Janeiro, DNER. 16 p.
- DNER –Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (1999). Especificação de serviço DNER-ES 385/99, Pavimentação – Concreto asfáltico com concreto polímero. 15 p.
- DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (1994). Método de ensaio DNER-ME 078/94, Agregado graúdo - adesividade a ligante betuminoso Rio de Janeiro, DNER. 3 p.
- DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (1994). Método de ensaio DNER-ME 079/94, Agregado - adesividade a ligante betuminoso Rio de Janeiro, DNER. 4 p.
- DNER –Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (1986). Método de ensaio DNER-ME 133/94, Misturas betuminosas-determinação do módulo de resiliência. Rio de Janeiro, DNER. 5 p.
- DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (1994). Método de ensaio DNER-ME 138/94, Misturas betuminosas-determinação da resistência à tração por



compressão diametral. 4 p.

DNER –Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (1998). Pesquisa de asfaltos modificados por polímeros – Relatório Final. *Ministério dos Transportes. Diretoria de Desenvolvimento Tecnológico. Tomo I e II.*

DNER –Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (1996). DNER PRO 269/96. Projeto de restauração de pavimentos flexíveis - TECNAPAV. 17 p.

FARRAR, M.; HARVEY, R.; KSAIBATI, K.; RAMANASUNDARAM, B. (1993). Performance of binder-modifiers in recycled asphalt pavement: field trial, 1987 to 1992. *Transportation Research Record 1417, p.64-73.*

FLECKENSTEIN, L.J.; MAHBOUB, K.; ALLEN, D.L. (1992). Performance of polymer modified asphalt mixes in Kentucky. *Polymer Modified Asphalt binders, American Society for Testing and Materials, ASTM STP 1108, p.173-185.*

FREITAS, F.J.S. (1996). Asfalto modificado com EVA. *Anais da 30ª Reunião Anual de Pavimentação, v.1, p.61-74.*

GONTIJO, P.R.A .-a (1980). Reologia, propriedades visco-elásticas lineares e conceito do módulo de rigidez de betumes puros e de misturas betuminosas-método de cálculo. *IBP- Instituto Brasileiro do Asfalto, 5º Encontro de Asfalto.p.257-305.*

GONTIJO, P.R.A .-b (1980). A fadiga de misturas betuminosas. Condição essencial no desenvolvimento racional de pavimentos flexíveis. *15º Reunião Anual de Pavimentação. 55 p.*

HIGGINS, W.A. (1987). Chemical modifiers to improve the strength and durability of asphalt concrete. *Transportation Research Record 1115, p.89-100.*

HILLS, J.F. (1973). The creep of asphalt mixes. *Journal of the institute of Petroleum, v.59, n.570, p.247-262.*

IBP – Instituto Brasileiro de Petróleo (1994). Informações básicas sobre materiais asfálticos. *Comissão de asfalto. 68p.*

IBP – Instituto Brasileiro de Petróleo (1996). *Informativo “O Asfalto”. Rio de Janeiro, p.1-5.*

ISACSSON, U.; LU,X. (1999). Characterization of bitumens modified with SEBS, EVA, and EBA polymers. *Journal of Materials Science. N.34, p.3737-3745.*

- KHATTAK, M.J.; BALADI, G.Y. (1998). Engineering properties of polymer-modified asphalt mixtures. *Transportation Research Record 1638*, p.12-22
- KHOSLA, N.P. (1991). Effect of the use of modifiers on performance of asphaltic pavements. *Transportation Research Record 1317*, p.10-22
- LEITE, L.F.M.; CONSTANTINO, R.S.; DUNLOP, M.S.; FIGUEIREDO, M.A.G. (1995). Asfalto modificado por polímero-ligante resistente à deformação de trincas e deformação permanente. *29º Reunião Anual de Pavimentação*. P.179-206.
- LEITE, L.F.M.; CONSTANTINO, R.S.; TONIAL, J.A; BASTOS, AC.R. (1997). Produção de asfaltos segundo especificações Superpave. *9º Congresso Ibero-Latinoamericano Del Asfalto. Assunción, Paraguay*.p. 87-98.
- LITTLE,D.N.(1992)Analysis of the influence of low density polyethylene modification (novophalt) of asphalt concrete on mixture shear strength and creep deformation potential. *Polymer Modified Asphalt binders, American Society for Testing and Materials, ASTM STP 1108*, p.186-202.
- 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. (1997). On polymer modified road bitumens. Suécia, 171 p. Tese (Doutorado). Royal Institute of Technology.
- LU, X.; ISACSSON, U.; EKBLAD, J. (1999). Rheological properties of SEBS, EVA and EBA polymer modified bitumens. *Materials and Structures, V. 32*, p.131-139.
- LU, X.; ISACSSON, U. (1997). Influence of styrene-butadiene-styrene and polymer modification on bitumen viscosity. *Fuel, V.76, N14/15*, p.1353-1359.
- MAHBOUB, K. (1990). Asphalt concrete creep as related to rutting. *Journal of Materials in Civil Engineering, v.2, N.3*, p.147-163.
- MARTINHO,F.G.; MONTENEGRO,F.G.; TRAJANO,L. (1994), Coperflex Asphalt – uma combinação asfalto e elastômero. *Anais do 12º Encontro de Asfalto, v.2*,p.281-291.
- Ministério dos Transportes (2000). Sistema de Transportes do Pará. <http://www.transportes.gov.br/> (27 março).

- MOMM, L. (1998). Estudo dos efeitos da granulometria sobre a macrotextura superficial do concreto asfáltico e seu comportamento mecânico. São Paulo, 259 p. Tese (Doutorado)-Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
- MONTEIRO, A .E.C. (1984). Uma introdução à visco-elasticidade. São Carlos, 87 p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- MOTTA, L. M. G. (1998). Contribuição para a estimativa do módulo resiliente de misturas asfálticas. *14º Encontro de Asfalto*.p. 30-39.
- MOTTA, L. M. G.; MEDINA, J.; SCALCO, R. (1993). O projeto estrutural de pavimentos flexíveis e a dosagem de misturas asfálticas. *27ª Reunião Anual de Pavimentação, v.1, p.524-545*.
- MOTTA, 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.152-178*.
- MOTTA, L.M.G; SÁ,M.F.P.; OLIVEIRA,P.M.F.; SOUSA, A M. (1996). O ensaio de creep estático e dinâmico na avaliação das misturas asfálticas. *30ª Reunião Anual de Pavimentação, p.115-135*.
- PAIS, J.C. (1999). Consideração da reflexão de fendas no dimensionamento de reforços de pavimentos flexíveis. Portugal, 262 p. Tese (Doutorado) - Universidade do Minho.
- PEREIRA, P.A .; PAIS, J.C.; AZEVEDO, M.C. (1998). Improvement of permanent deformation and fatigue life of bituminous mixtures by using modified bitumens. *5<sup>th</sup> International Conference on the bearing Capacity of Roads and Airfields. Proceedings, V.II. p.1117-1123*.
- PERL, M.; UZAN, J.; SIDES, A . (1993). Visco-elasto-plastic constitutive law for a bituminous mixture under repeated loading. *Transportation Research Record 911, p.20-27*.
- PINTO, S. (1991). Estudo do comportamento à fadiga de misturas betuminosas e aplicação na avaliação estrutural de pavimentos. Rio de Janeiro,478 p. Tese (Doutorado)-Universidade Federal do Rio de Janeiro-UFRJ.

- PINTO, S.; PREUSSLER, E.S. (1980). Módulos resilientes de concretos asfálticos. *Anais do 5º Encontro de Asfalto do IBP*. 55 p.
- PONNIAH, J.; KENNEPOHL, G. (1996). Polymer-modified asphalt pavements in Ontario: performance and cost-effectiveness. *Transportation Research Record 1545*, p.151-160.
- PRADHAN, M.M.; ARMIJO, J.D. (1993). Assessing effects of commercial modifiers on Montana asphalts by conventional testing method. *Transportation Research Record 1417*, p.84-92.
- PREUSSLER, E.S. (1983). Estudo da deformação resiliente de pavimentos flexíveis e aplicação ao projeto de camadas de reforço. Rio de Janeiro, 252 p. Tese(Doutorado)- Universidade Federal do Rio de Janeiro-UFRJ.
- REIS, R.M.M.; SANTO, N.R.E. (1999). Asfalto modificado com polímero-tecnologia de ponta para prolongar a vida dos pavimentos asfálticos. *Publicação da Ipiranga Asfaltos S.A* . 71p.
- RAMOS, C.R.; LÁO, V.L.DO E.S.T.; MARTINHO, F.G., MACEDO; M.M.D.(1996). Asfalto modificado com polímero uma opção para melhoria dos asfaltos nacionais. *Anais do 13º Encontro de Asfalto, V.1*, P.60-82.
- ROGGE, D.F.; TERREL, R.L.; GEORGE, A. J. (1992). Polymer modified hot mix asphalt-Oregon experience. *Polymer Modified Asphalt binders, American Society for Testing and Materials, ASTM STP 1108*, p. 151-171.
- ROWE, G.M.; BROWN, S.F.; SHARROCK, M.J.; BOULDIN, M.G. (1995). Viscoelastic analysis of hot mix asphalt pavement structures. *Transportation Research Record 1482*, p.44-51.
- SÁ, M.F.P.; MOTTA, L.M.G. (1996). Utilização de ensaios de creep estático e dinâmico para caracterização de misturas asfálticas. *13º Encontro de Asfalto, v.1*, p.91-115.
- SANTANA, H.; GONTIJO, P.R.A . (1988). Conceituação das propriedades reológicas e não reológicas dos materiais usados em pavimentação. *23º Reunião Anual de Pavimentação.V.2*. p. 917-954.
- SHULER, T.S.; HANSON, D. I.; MCKEEN, R.G. (1992). Design and construction of asphalt concrete using polymer modified asphalt binders. *Polymer Modified Asphalt*

- binders, American Society for Testing and Materials, ASTM STP 1108, p.97-127*
- 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.*
- STUART, K.D. (1993). Asphalt mixtures containing chemically modified binders. *Transportation Research Record 1417, p.74-83.*
- TAYEBALI, A .A.; GOODRICH, J.L.; SOUSA, J.B. e MONISMITH, C.L. (1992). Influence of the rheological properties of modified asphalt binders on the load deformation characteristics of the binder – aggregate mixtures. *Polymer Modified Asphalt binders, American Society for Testing and Materials, ASTM STP 1108, p.77-95.*
- VALKERING, C.P.; LANCON, D.J.L.; HILSTER, E.; STOKER, D.A (1990) Rutting resistance of asphalt mixes containing non-conventional and polymer-modified binders. *Symposium - Improved Rut Resistance, Association of Asphalt Paving Technologists (AAPT), Proceedings, P.590-609.*
- VAN DE LOO, P.J. (1974). Creep testing, a simple tool to judge asphalt mix stability. *Association of Asphalt Paving Technologists (AAPT), Proceedings, v.43, p.253-284.*
- 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 toll in asphalt mix design and in the prediction of pavement rutting. *Association of Asphalt Paving Technologists (AAPT), Proceedings, v.47, p.522-557.*
- VINHA, A M. (1975). Cap-dop agente melhorador de adesividade. *Produtos asfálticos aplicáveis em pavimentação rodoviária. Petrobrás Distribuidora S.A . BR Asfaltos. 8 p.*
- ZANZOTTO, L.; KENNEPOHL, G.J. (1996). Development of rubber and asphalt binders by depolymerization and devulcanization of scrap tires in asphalt. *Transportation Research Record 1530, p.51-58.*
- ZHOU,H.; NODES,S.E.; NICHOLS, J. E.(1994). Evaluation of three polymer modified

asphalt concretes. *Transportation Research Record 1454*, pag.181-192.

## **ANEXO I**

OFÍCIO DO 2º DISTRITO RODOVIÁRIO FEDERAL



MINISTÉRIO DOS TRANSPORTES  
DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM-DNER  
2º DISTRITO RODOVIÁRIO FEDERAL



**INFORMAÇÕES REFERENTES AO REVESTIMENTO ASFÁLTICO, TIPO  
CONCRETO BETUMINOSO USINADO A QUENTE, UTILIZADO EM  
ALGUMAS RODOVIAS PAVIMENTADAS DO ESTADO DO PARÁ.**

O Pará possui duas rodovias federais pavimentadas:

- BR-316, trecho Belém – Divisa PA/MA, com 277,5 Km de extensão e
- BR-010, também conhecida por Belém – Brasília, trecho Santa Maria – Utinga, com 360 Km de extensão.

Ambas têm pista de rolamento revestidas em concreto betuminoso (CBUQ).

Os agregados constituintes dessas misturas asfálticas, de modo geral são:

- Agregado graúdo e médio: seixo rolado, extraído de depósitos aluvionares, abundantes no Estado. Após extração são submetidos a tratamento de lavagem e peneiramento para separação das frações graúda e média.
- Agregado fino: constituído por solos arenosos com E.A. superior a 55. Com frequência utiliza-se uma mistura de dois areais, objetivando a obtenção de curva granulométrica que enquadre nas peneiras de nºs 40, 80 e 200. Este resultado comumente não se obtém com a utilização de um só areal, devido se apresentarem ora com excesso, ora com falta de finos.
- Filler mineral: constituído por cimento Portland ou pó calcário, que auxilia na obtenção de percentual granulométrico aceitável na peneira nº 200.

Os Projetos de Engenharia de Pavimentação das Rodovias citadas (ano de 1972), recomendaram o seixo rolado, por uma razão simples: inexistência de ocorrências pétreas com volume suficiente para atendimento da demanda. As Rodovias BR-316 e BR-010 cortam, respectivamente, o leste e o sudeste paraense, atualmente uma única pedreira (gneiss) comercial é conhecida, localizada na Cidade de Bragança (região leste), distante 200 Km de Belém, com pequeno volume. A própria construção civil de Belém utiliza o seixo como agregado graúdo nas estruturas de concreto.

Ao longo dos anos a experiência tem comprovado a boa qualidade do CBUQ com seixo, confirmada na existência de segmentos que embora submetidos a pesado tráfego de caminhões e carretas, mantiveram as boas condições iniciais e somente foram recapeados após 20 anos de uso. É o caso, na Rodovia BR-316, do segmento Barro Branco – Divisa PA/MA, com 206,5 Km de extensão e na BR-010, no segmento entre Santa Maria e Paragominas, com 180 Km.

Belém, 24 de junho de 1999

*Elmir Saady*  
ENGº ELMIR NOBRE SAADY  
CHEFE DO 2º DRF/DNER



## **ANEXO II**

**CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DOS CORPOS-DE-PROVA**

TABELA 01 – Características físicas dos corpos-de-prova moldados com 4,0% de asfalto convencional.

ASFALTO CONVENCIONAL								
P <sub>b</sub> = 4,0%			D = 2,484			P <sub>agreg</sub> = 96%		
C.P.Nº	M <sub>ar</sub>	M <sub>imerso</sub>	V <sub>cp</sub> (cm <sup>3</sup> )	d	V <sub>v</sub> (%)	V <sub>b</sub> (%)	VAM (%)	RBV (%)
O1	1238,43	718,5	519,93	2,382	4,102	9,250	13,352	69,279
O2	1232,33	708,3	524,03	2,352	5,321	9,133	14,453	63,186
O3	1231,44	708,5	522,94	2,355	5,192	9,145	14,337	63,786
1A	1231,65	706,2	525,45	2,344	5,629	9,103	14,732	61,791
2A	1227,76	706,6	521,16	2,356	5,152	9,149	14,301	63,972
3A	1227,59	706,9	520,69	2,358	5,080	9,156	14,236	64,315
1B	1230,14	709,2	520,94	2,361	4,928	9,170	14,099	65,044
2B	1237,57	712,1	525,47	2,355	5,179	9,146	14,325	63,848
3B	1237,04	713,3	523,74	2,362	4,906	9,173	14,079	65,151
1C	1234,39	707,1	527,29	2,341	5,749	9,091	14,840	61,261
2C	1240,44	708,9	531,54	2,334	6,044	9,063	15,107	59,991
3C	1241,45	711,4	530,05	2,342	5,703	9,096	14,799	61,461

TABELA 02 – Características físicas dos corpos-de-prova moldados com 4,0% de asfalto modificado.

ASFALTO MODIFICADO								
P <sub>b</sub> = 4,0%			D = 2,481			P <sub>agreg</sub> = 96%		
C.P.Nº	M <sub>ar</sub>	M <sub>imerso</sub>	V <sub>cp</sub> (cm <sup>3</sup> )	d	V <sub>v</sub> (%)	V <sub>b</sub> (%)	VAM (%)	RBV (%)
PA	1236,04	714,6	521,44	2,370	4,474	9,296	13,770	67,509
PB	1232,55	708,1	524,45	2,350	5,290	9,216	14,507	63,532
PC	1235,94	714,1	521,84	2,368	4,555	9,288	13,843	67,096
P1	1233,98	701,2	532,78	2,316	6,663	9,083	15,746	57,684
P2	1239,93	710	529,93	2,340	5,708	9,176	14,884	61,647
P3	1243,44	717,9	525,54	2,366	4,652	9,279	13,930	66,607
P1A	1232,57	703,3	529,27	2,329	6,151	9,133	15,284	59,753
P2A	1234,99	709,5	525,49	2,350	5,291	9,216	14,507	63,531
P3A	1237,74	711,2	526,54	2,351	5,269	9,218	14,487	63,631
P1B	1243,32	716,1	527,22	2,358	4,965	9,248	14,213	65,069
P2B	1240,14	714,1	526,04	2,358	4,995	9,245	14,240	64,923
P3B	1237,14	710,6	526,54	2,350	5,315	9,214	14,529	63,418
P1C	1243,13	717,2	525,93	2,364	4,746	9,269	14,015	66,137
P2C	1232,47	711	521,47	2,363	4,755	9,268	14,024	66,091
P3C	1231,16	707	524,16	2,349	5,345	9,211	14,556	63,281

TABELA 03 – Características físicas dos corpos-de-prova moldados com 4,5% de asfalto convencional.

ASFALTO CONVENCIONAL								
P <sub>b</sub> = 4,5%			D = 2,466			P <sub>agreg</sub> = 95,5%		
C.P.Nº	M <sub>ar</sub>	M <sub>imerso</sub>	V <sub>cp</sub> (cm <sup>3</sup> )	d	V <sub>v</sub> (%)	V <sub>b</sub> (%)	VAM (%)	RBV (%)
O	1240,44	716,5	523,94	2,368	3,981	10,344	14,324	72,210
OO	1238,45	714,6	523,85	2,364	4,118	10,329	14,447	71,494
O4	1227,3	709,7	517,6	2,371	3,834	10,359	14,193	72,987
O5	1229,58	709,2	520,38	2,363	4,170	10,323	14,493	71,227
O6	1232,87	707,9	524,97	2,348	4,754	10,260	15,014	68,337
4A	1236,22	715,6	520,62	2,375	3,697	10,374	14,071	73,726
5A	1236,65	714,1	522,55	2,367	4,019	10,339	14,359	72,007
6A	1240,95	717,1	523,85	2,369	3,925	10,350	14,274	72,505
4B	1229,62	712,3	517,32	2,377	3,600	10,385	13,985	74,256
5B	1244,68	719,7	524,98	2,371	3,843	10,358	14,202	72,938
6B	1236,03	716,2	519,83	2,378	3,566	10,388	13,954	74,448
4C	1247,48	716	531,48	2,347	4,806	10,255	15,060	68,091
5C	1250,48	720,7	529,78	2,360	4,271	10,312	14,583	70,716
6C	1241,82	714,9	526,92	2,357	4,417	10,296	14,714	69,978

TABELA 04 – Características físicas dos corpos-de-prova moldados com 4,5% de asfalto modificado.

ASFALTO MODIFICADO								
P <sub>b</sub> = 4,5%			D = 2,463			P <sub>agreg</sub> = 95,5%		
C.P.Nº	M <sub>ar</sub>	M <sub>imerso</sub>	V <sub>cp</sub> (cm <sup>3</sup> )	d	V <sub>v</sub> (%)	V <sub>b</sub> (%)	VAM (%)	RBV (%)
PD	1243,31	717,6	525,71	2,365	3,981	10,434	14,415	72,382
PE	1233,49	709,1	524,39	2,352	4,500	10,378	14,877	69,754
PF	1244,13	721,7	522,43	2,381	3,315	10,506	13,821	76,017
P4	1242,37	720,1	522,27	2,379	3,422	10,495	13,917	75,412
P5	1239,2	716,8	522,4	2,372	3,692	10,465	14,158	73,920
P6	1247,9	724,2	523,7	2,383	3,257	10,513	13,769	76,347
P4A	1238,3	713,3	525	2,359	4,239	10,406	14,645	71,056
P5A	1235,2	712,6	522,6	2,364	4,040	10,428	14,467	72,076
P6A	1244,29	719,2	525,09	2,370	3,792	10,454	14,247	73,382
P4B	1244,59	717,7	526,89	2,362	4,098	10,421	14,519	71,777
P5B	1239,64	714,4	525,24	2,360	4,179	10,412	14,591	71,360
P6B	1240,2	717,7	522,5	2,374	3,633	10,472	14,105	74,243
P4C	1234,02	711,1	522,92	2,360	4,190	10,411	14,601	71,303
P5C	1240,26	718,6	521,66	2,378	3,473	10,489	13,962	75,125
P6C	1236,21	715,5	520,71	2,374	3,613	10,474	14,087	74,353

TABELA 05 – Características físicas dos corpos-de-prova moldados com 5,0% de asfalto convencional.

ASFALTO CONVENCIONAL								
P <sub>b</sub> = 5,0%			D = 2,448			P <sub>agreg</sub> = 95%		
C.P.Nº	M <sub>ar</sub>	M <sub>imerso</sub>	V <sub>cp</sub> (cm <sup>3</sup> )	d	V <sub>v</sub> (%)	V <sub>b</sub> (%)	VAM (%)	RBV (%)
O1	1253,98	725,7	528,28	2,374	3,027	11,523	14,550	79,193
O2	1242,7	720,5	522,2	2,380	2,781	11,552	14,333	80,598
O3	1244,8	721,7	523,1	2,380	2,784	11,552	14,336	80,579
O7	1241,06	718,7	522,36	2,376	2,939	11,533	14,472	79,693
O8	1242,75	719,3	523,45	2,374	3,009	11,525	14,534	79,296
O9	1248,78	722,3	526,48	2,372	3,099	11,514	14,614	78,791
7A	1244,54	721,3	523,24	2,379	2,830	11,546	14,377	80,312
8A	1252,39	724,2	528,19	2,371	3,134	11,510	14,644	78,600
9A	1247,71	722,8	524,91	2,377	2,893	11,539	14,432	79,955
7B	1234,68	715,5	519,18	2,378	2,846	11,544	14,391	80,221
8B	1243,49	714,9	528,59	2,352	3,895	11,420	15,315	74,567
9B	1243,82	715,8	528,02	2,356	3,766	11,435	15,201	75,227
7C	1251,25	722,3	528,95	2,366	3,361	11,483	14,844	77,357
8C	1248,83	722,1	526,73	2,371	3,142	11,509	14,651	78,557
9C	1246,95	717,4	529,55	2,355	3,802	11,431	15,233	75,039

TABELA 06 – Características físicas dos corpos-de-prova moldados com 5,0% de asfalto modificado.

ASFALTO MODIFICADO								
P <sub>b</sub> = 5,0%			D = 2,445			P <sub>agreg</sub> = 95%		
C.P.Nº	M <sub>ar</sub>	M <sub>imerso</sub>	V <sub>cp</sub> (cm <sup>3</sup> )	d	V <sub>v</sub> (%)	V <sub>b</sub> (%)	VAM (%)	RBV (%)
PG	1245,35	721	524,35	2,375	2,860	11,642	14,502	80,279
PH	1236,23	717,3	518,93	2,382	2,564	11,678	14,242	81,995
PI	1254,43	724,4	530,03	2,367	3,200	11,602	14,802	78,379
P7	1251,59	726	525,59	2,381	2,604	11,673	14,277	81,763
P8	1246,97	721,6	525,37	2,374	2,922	11,635	14,557	79,924
P9	1249,7	724,9	524,8	2,381	2,604	11,673	14,277	81,759
P7A	1250,5	721,9	528,6	2,366	3,243	11,596	14,839	78,149
P8A	1252,21	725,8	526,41	2,379	2,707	11,661	14,368	81,158
P9A	1252,39	726,4	525,99	2,381	2,615	11,672	14,287	81,694
P7B	1242,45	720,9	521,55	2,382	2,566	11,678	14,243	81,985
P8B	1248,27	722,4	525,87	2,374	2,914	11,636	14,550	79,974
P9B	1247,41	721,7	525,71	2,373	2,951	11,631	14,582	79,763
P7C	1245,69	720,8	524,89	2,373	2,933	11,634	14,567	79,862
P8C	1249,18	724,1	525,08	2,379	2,697	11,662	14,359	81,219
P9C	1247,55	724,8	522,75	2,387	2,391	11,699	14,089	83,033

TABELA 07 – Características físicas dos corpos-de-prova moldados com 5,5% de asfalto convencional.

ASFALTO CONVENCIONAL								
P <sub>b</sub> = 5,5%			D = 2,430			P <sub>agreg</sub> = 94,5%		
C.P.Nº	M <sub>ar</sub>	M <sub>imerso</sub>	V <sub>cp</sub> (cm <sup>3</sup> )	d	V <sub>v</sub> (%)	V <sub>b</sub> (%)	VAM (%)	RBV (%)
O4	1241,8	718	523,8	2,371	2,446	12,659	15,106	83,805
O5	1243,74	716,7	527,04	2,360	2,895	12,601	15,496	81,320
O6	1240,18	715,2	524,98	2,362	2,793	12,614	15,407	81,875
10	1240,5	717,3	523,2	2,371	2,437	12,661	15,097	83,860
11	1234,34	709,1	525,24	2,350	3,298	12,549	15,847	79,187
12	1247,53	718,2	529,33	2,357	3,020	12,585	15,605	80,647
10A	1246,25	718,2	528,05	2,360	2,885	12,602	15,487	81,373
11A	1251,88	724,4	527,48	2,373	2,341	12,673	15,014	84,410
12A	1239,47	712,4	527,07	2,352	3,233	12,557	15,791	79,523
10B	1243,22	715,6	527,62	2,356	3,042	12,582	15,624	80,531
11B	1246,69	718,9	527,79	2,362	2,803	12,613	15,416	81,820
12B	1218,84	702,9	515,94	2,362	2,791	12,615	15,406	81,881
10C	1251,82	719,3	532,52	2,351	3,270	12,553	15,822	79,336
11C	1245,76	715,8	529,96	2,351	3,273	12,552	15,825	79,319
12C	1254,68	724,1	530,58	2,365	2,694	12,627	15,321	82,416

TABELA 08 – Características físicas dos corpos-de-prova moldados com 5,5% de asfalto modificado.

ASFALTO MODIFICADO								
P <sub>b</sub> = 5,5%			D = 2,427			P <sub>agreg</sub> = 94,5%		
C.P.Nº	M <sub>ar</sub>	M <sub>imerso</sub>	V <sub>cp</sub> (cm <sup>3</sup> )	d	V <sub>v</sub> (%)	V <sub>b</sub> (%)	VAM (%)	RBV (%)
PJ	1248,78	719,3	529,48	2,359	2,827	12,717	15,544	81,814
PK	1250,9	724	526,9	2,374	2,185	12,801	14,987	85,418
PL	1238,76	712,3	526,46	2,353	3,054	12,688	15,741	80,601
P10	1253,21	724,8	528,41	2,372	2,285	12,788	15,073	84,842
P11	1247,39	717,5	529,89	2,354	3,010	12,693	15,704	80,831
P12	1250,89	719,7	531,19	2,355	2,976	12,698	15,674	81,013
P10A	1249,77	720,2	529,57	2,360	2,766	12,725	15,492	82,143
P11A	1250,67	718,8	531,87	2,351	3,117	12,679	15,797	80,267
P12A	1242,3	715,9	526,4	2,360	2,766	12,725	15,491	82,147
P10B	1248,72	718,8	529,92	2,356	2,912	12,706	15,619	81,354
P11B	1254,11	722,2	531,91	2,358	2,858	12,713	15,571	81,646
P12B	1252,77	720,5	532,27	2,354	3,027	12,691	15,719	80,740
P10C	1250,84	719,9	530,94	2,356	2,934	12,703	15,638	81,236
P11C	1245,63	718	527,63	2,361	2,732	12,730	15,462	82,330
P12C	1252,34	721,7	530,64	2,360	2,763	12,726	15,489	82,162

TABELA 09 – Características físicas dos corpos-de-prova moldados com 6,0% de asfalto convencional.

ASFALTO CONVENCIONAL								
P <sub>b</sub> = 6,0%			D = 2,413			P <sub>agreg</sub> = 94%		
C.P.Nº	M <sub>ar</sub>	M <sub>imerso</sub>	V <sub>cp</sub> (cm <sup>3</sup> )	d	V <sub>v</sub> (%)	V <sub>b</sub> (%)	VAM (%)	RBV (%)
O7	1244,58	713,2	531,38	2,342	2,929	13,644	16,573	82,324
O8	1250,76	720	530,76	2,357	2,333	13,727	16,061	85,471
O9	1255,06	722	533,06	2,354	2,421	13,715	16,136	84,999
13	1242,86	710,9	531,96	2,336	3,169	13,610	16,779	81,112
14	1240,54	711,7	528,84	2,346	2,780	13,665	16,445	83,096
15	1238,23	706,9	531,33	2,330	3,416	13,575	16,991	79,898
13A	1247,88	716,2	531,68	2,347	2,727	13,672	16,399	83,371
14A	1232,67	704,4	528,27	2,333	3,292	13,593	16,885	80,501
15A	1250,73	719,7	531,03	2,355	2,385	13,720	16,106	85,189
13B	1245,74	711,6	534,14	2,332	3,341	13,586	16,927	80,262
14B	1230,43	704	526,43	2,337	3,131	13,615	16,746	81,305
15B	1243,82	713,7	530,12	2,346	2,758	13,668	16,426	83,209
13C	1240,79	710,8	529,99	2,341	2,971	13,638	16,609	82,111
14C	1248,49	715,8	532,69	2,344	2,864	13,653	16,517	82,661
15C	1239,78	707,3	532,48	2,328	3,504	13,563	17,067	79,471

TABELA 10 – Características físicas dos corpos-de-prova moldados com 6,0% de asfalto modificado.

ASFALTO MODIFICADO								
P <sub>b</sub> = 6,0%			D = 2,410			P <sub>agreg</sub> = 94%		
C.P.Nº	M <sub>ar</sub>	M <sub>imerso</sub>	V <sub>cp</sub> (cm <sup>3</sup> )	d	V <sub>v</sub> (%)	V <sub>b</sub> (%)	VAM (%)	RBV (%)
PM	1245,24	715,1	530,14	2,349	2,517	13,817	16,334	84,592
PN	1248,06	710,9	537,16	2,323	3,573	13,667	17,240	79,277
PO	1250,7	716,3	534,4	2,340	2,870	13,767	16,637	82,751
P13	1246,58	716,2	530,38	2,350	2,456	13,826	16,281	84,916
P14	1245,06	714,8	530,26	2,348	2,553	13,812	16,365	84,401
P15	1244,03	714,4	529,63	2,349	2,518	13,817	16,334	84,587
P13A	1248,67	714,6	534,07	2,338	2,967	13,753	16,721	82,253
P14A	1245,99	714,1	531,89	2,343	2,779	13,780	16,559	83,218
P15A	1246,58	709,7	536,88	2,322	3,637	13,658	17,295	78,972
P13B	1249,02	712,2	536,82	2,327	3,437	13,686	17,124	79,926
P15B	1236,79	707,3	529,49	2,336	3,059	13,740	16,799	81,789
P13C	1242,66	709,8	532,86	2,332	3,215	13,718	16,933	81,013
P14C	1250,42	710,2	540,22	2,315	3,938	13,616	17,553	77,567
P15C	1243,83	708,9	534,93	2,325	3,499	13,678	17,177	79,630

## **ANEXO III**

RESULTADOS DOS ENSAIOS MARSHALL

TABELA 01 – Resultados dos ensaios Marshall para corpos-de-prova moldados com asfalto convencional.

CP	d	Vv (%)	RBV (%)	Def.do anel	F <sub>c</sub>	E (kgf)	F (0,01")	CSM(kgf/0,01")
P <sub>b</sub> = 4,0 %		D = 2,484			P <sub>agreg</sub> = 96 %			
1C	2,341	5,749	61,261	14,300	0,960	624,624	14,000	44,616
3C	2,342	5,703	61,461	18,000	0,960	786,240	12,000	65,520
MÉDIA	2,3416	5,7262	61,3612	16,1500	0,9600	705,432	13,000	55,0680
P <sub>b</sub> = 4,5 %		D = 2,466			P <sub>agreg</sub> = 95,5 %			
OO	2,364	4,118	71,494	19,700	0,960	860,496	14,000	61,464
4B	2,377	3,600	74,256	21,300	1,000	969,150	13,000	74,550
6C	2,357	4,417	69,978	18,800	0,960	821,184	13,000	63,168
MÉDIA	2,366	4,045	71,909	19,933	0,973	883,610	13,333	66,394
P <sub>b</sub> = 5,0 %		D = 2,448			P <sub>agreg</sub> = 95 %			
9A	2,377	2,893	79,955	19,500	0,960	851,760	15,000	56,784
7B	2,378	2,846	80,221	17,200	1,000	782,600	15,000	52,173
9C	2,355	3,802	75,039	19,000	0,960	829,920	13,000	63,840
MÉDIA	2,370	3,181	78,405	18,567	0,973	821,427	14,333	57,599
P <sub>b</sub> = 5,5 %		D = 2,430			P <sub>agreg</sub> = 94,5 %			
11	2,350	3,298	79,187	11,400	0,960	497,952	18,000	27,664
12A	2,352	3,233	79,523	11,000	0,960	480,480	18,000	26,693
11C	2,351	3,273	79,319	12,600	0,960	550,368	17,000	32,375
MÉDIA	2,351	3,268	79,343	11,667	0,960	509,600	17,667	28,911
P <sub>b</sub> = 6,0 %		D = 2,413			P <sub>agreg</sub> = 94 %			
O8	2,357	2,333	85,471	11,500	0,960	502,320	20,000	25,116
14	2,346	2,780	83,096	21,200	0,960	926,016	20,000	46,301
13B	2,332	3,341	80,262	20,900	0,960	912,912	20,000	45,646
MÉDIA	2,345	2,818	82,943	17,867	0,960	780,416	20,000	39,021



TABELA 02 – Resultados dos ensaios Marshall para corpos-de-prova moldados com asfalto modificado.

CP	d	V <sub>v</sub> (%)	RBV (%)	Def.do anel	F <sub>c</sub>	E (kgf)	F (0,01")	CSM(kgf/0,01")
P <sub>b</sub> = 4,0 %								
			D = 2,481			P <sub>agreg</sub> = 96 %		
PB	2,350	5,290	63,532	23,100	0,960	1009,008	13,000	77,616
PC	2,368	4,555	67,096	26,900	1,000	1223,950	14,000	87,425
P2	2,340	5,708	61,647	25,200	0,960	1100,736	14,000	78,624
MÉDIA	2,353	5,185	64,092	25,067	0,973	1111,231	13,667	81,222
P <sub>b</sub> = 4,5 %								
			D = 2,463			P <sub>agreg</sub> = 95,5 %		
PE	2,352	4,500	69,754	18,700	0,960	816,816	14,000	58,344
P4	2,379	3,422	75,412	29,000	0,988	1303,666	17,000	76,686
P6A	2,370	3,792	73,382	26,300	0,960	1148,784	16,000	71,799
MÉDIA	2,367	3,905	72,849	24,667	0,969	1089,755	15,667	68,943
P <sub>b</sub> = 5,0 %								
			D = 2,445			P <sub>agreg</sub> = 95 %		
P7	2,381	2,604	81,763	20,800	0,960	908,544	16,000	56,784
P9	2,381	2,604	81,759	26,000	0,960	1135,680	15,000	75,712
P7A	2,366	3,243	78,149	21,500	0,960	939,120	18,000	52,173
MÉDIA	2,376	2,817	80,557	22,767	0,960	994,448	16,333	61,556
P <sub>b</sub> = 5,5 %								
			D = 2,427			P <sub>agreg</sub> = 94,5 %		
P11A	2,351	3,117	80,267	14,700	0,960	642,096	16,000	40,131
P10B	2,356	2,912	81,354	17,100	0,960	746,928	17,000	43,937
P11B	2,358	2,858	81,646	14,200	0,960	620,256	17,000	36,486
MÉDIA	2,355	2,962	81,089	15,333	0,960	669,760	16,667	40,185
P <sub>b</sub> = 6,0 %								
			D = 2,410			P <sub>agreg</sub> = 94 %		
PO	2,340	2,870	82,751	14,100	0,960	615,888	20,000	30,794
P14	2,348	2,553	84,401	13,500	0,960	589,680	20,000	29,484
P15	2,349	2,518	84,587	15,000	0,960	655,200	20,000	32,760
MÉDIA	2,346	2,647	83,913	14,200	0,960	620,256	20,000	31,013

## **ANEXO IV**

**RESULTADOS DOS ENSAIOS DE FLUÊNCIA POR COMPRESSÃO UNIAXIAL  
ESTÁTICA**

TABELA 01 – Resultado do ensaio de fluência realizado com o corpo-de-prova 2A

ENSAIO DE FLUÊNCIA POR COMPRESSÃO UNIAXIAL ESTÁTICA					
Asfalto convencional			Corpo-de-prova: 2A		
Tempo (s)	Def. (%)	MF (MPa)	Tempo (s)	Def. (%)	MF (MPa)
30	0,126	79,142	1900	0,187	53,615
60	0,135	73,953	2000	0,187	53,531
90	0,140	71,465	2100	0,187	53,370
120	0,142	70,586	2400	0,189	52,867
150	0,145	68,847	2500	0,190	52,712
180	0,148	67,433	2700	0,191	52,380
210	0,150	66,486	2800	0,191	52,235
240	0,152	65,617	3000	0,192	52,126
270	0,154	64,992	3300	0,193	51,717
300	0,156	64,233	3600	0,195	51,251
360	0,159	63,033	DESCARREGAMENTO		
420	0,161	61,924	3630	0,099	101,420
480	0,164	60,998	3660	0,095	105,708
540	0,166	60,179	3690	0,093	107,991
600	0,167	59,770	3720	0,092	108,932
660	0,169	59,180	3750	0,091	110,132
720	0,171	58,508	3780	0,090	111,111
780	0,172	58,141	3810	0,090	111,732
840	0,173	57,680	3840	0,089	112,233
900	0,175	57,223	3870	0,089	112,740
960	0,176	56,851	3900	0,088	113,250
990	0,176	56,790	3960	0,088	114,025
1000	0,176	56,691	4020	0,087	114,416
1100	0,178	56,229	4080	0,087	115,075
1200	0,179	55,783	4140	0,086	115,875
1300	0,181	55,306	4200	0,086	116,144
1400	0,182	54,812	4260	0,086	116,144
1500	0,184	54,493	4320	0,086	116,550
1600	0,185	54,125	4380	0,086	116,822
1700	0,185	54,179	4440	0,086	116,959
1800	0,186	53,833	4500	0,085	117,371
DADOS DO CORPO-DE-PROVA ENSAIADO					
Mar (g)	1227,76	Tensão normal (Kgf/cm <sup>2</sup> )		1,0	
Mimersa (g)	706,6				
d	2,355822	Def. T (%)		0,195	
D (mm)	101,7067	Def. vp (%)		0,085	
H (mm)	64,91333	Def. el (%)		0,11	
Pagreg (pcm)	96,0	MF (MPa)		51,251	
Pb (pcm)	4,0				
D	2,483799				
Vv (5)	5,152475				
RBV (%)	63,97197				

TABELA 02 – Resultado do ensaio de fluência realizado com o corpo-de-prova 3.

ENSAIO DE FLUÊNCIA POR COMPRESSÃO UNIAXIAL ESTÁTICA					
Asfalto convencional			Corpo-de-prova: 3		
Tempo (s)	Def. (%)	MF (MPa)	Tempo (s)	Def. (%)	MF (MPa)
30	0,120	83,426	1900	0,157	63,616
60	0,126	79,578	2000	0,158	63,253
90	0,128	78,176	2100	0,158	63,201
120	0,131	76,283	2400	0,160	62,615
150	0,133	75,246	2500	0,160	62,497
180	0,135	74,319	2700	0,161	62,196
210	0,136	73,624	2800	0,161	62,152
240	0,137	72,961	3000	0,161	61,921
270	0,138	72,362	3300	0,162	61,636
300	0,139	71,802	3600	0,164	60,954
360	0,141	70,959	DESCARREGAMENTO		
420	0,142	70,349	3630	0,068	146,413
480	0,144	69,670	3660	0,065	153,610
540	0,145	69,127	3690	0,064	156,495
600	0,146	68,656	3720	0,063	159,236
660	0,147	68,184	3750	0,062	161,031
720	0,147	67,866	3780	0,062	162,338
780	0,148	67,620	3810	0,061	163,666
840	0,149	67,197	3840	0,061	164,474
900	0,149	66,913	3870	0,060	165,563
960	0,150	66,723	3900	0,060	166,113
990	0,150	66,600	3960	0,060	167,785
1000	0,150	66,500	4020	0,059	168,919
1100	0,151	66,106	4080	0,059	169,779
1200	0,152	65,738	4140	0,059	170,940
1300	0,153	65,416	4200	0,058	171,527
1400	0,153	65,156	4260	0,058	172,414
1500	0,154	64,742	4320	0,058	172,712
1600	0,155	64,453	4380	0,058	173,611
1700	0,156	64,188	4440	0,058	173,913
1800	0,156	63,955	4500	0,057	174,825
DADOS DO CORPO-DE-PROVA ENSAIADO					
Mar (g)	1231,44	Tensão normal (Kgf/cm <sup>2</sup> )		1,0	
Mimersa (g)	708,5				
d	2,35484	Def. T (%)		0,164	
D (mm)	101,7333	Def.vp (%)		0,057	
H (mm)	64,84	Def. el (%)		0,107	
Pagreg (pcm)	96,0	MF (MPa)		60,954	
Pb (pcm)	4,0				
D	2,483799				
Vv (5)	5,191999				
RBV (%)	63,78604				

TABELA 03 – Resultado do ensaio de fluência realizado com o corpo-de-prova 1.

ENSAIO DE FLUÊNCIA POR COMPRESSÃO UNIAXIAL ESTÁTICA					
Asfalto convencional			Corpo-de-prova: 1		
Tempo (s)	Def. (%)	MF (MPa)	Tempo (s)	Def. (%)	MF (MPa)
30	0,145	69,126	1900	0,161	62,195
60	0,149	67,152	2000	0,161	62,049
90	0,150	66,462	2100	0,162	61,795
120	0,151	66,099	2400	0,162	61,849
150	0,152	65,662	2500	0,162	61,722
180	0,153	65,416	2700	0,162	61,617
210	0,153	65,167	2800	0,162	61,605
240	0,154	64,985	3000	0,163	61,427
270	0,154	64,863	3300	0,163	61,328
300	0,155	64,695	3600	0,165	60,706
360	0,155	64,481	DESCARREGAMENTO		
420	0,156	64,237	3630	0,044	228,311
480	0,156	64,191	3660	0,039	253,807
540	0,156	64,011	3690	0,037	269,542
600	0,157	63,835	3720	0,036	276,243
660	0,157	63,717	3750	0,035	284,091
720	0,157	63,577	3780	0,034	290,698
780	0,157	63,536	3810	0,034	294,985
840	0,159	62,897	3840	0,033	301,205
900	0,158	63,230	3870	0,033	305,810
960	0,158	63,215	3900	0,033	307,692
990	0,159	63,077	3960	0,032	314,465
1000	0,158	63,207	4020	0,032	313,480
1100	0,159	63,012	4080	0,031	325,733
1200	0,159	62,696	4140	0,030	331,126
1300	0,160	62,642	4200	0,030	334,448
1400	0,160	62,536	4260	0,030	334,448
1500	0,160	62,540	4320	0,030	337,838
1600	0,160	62,544	4380	0,029	343,643
1700	0,160	62,400	4440	0,029	343,643
1800	0,161	62,204	4500	0,029	350,877
DADOS DO CORPO-DE-PROVA ENSAIADO					
Mar (g)	1238,43	Tensão normal (Kgf/cm <sup>2</sup> )		1,0	
Mimersa (g)	718,5				
d	2,381917	Def. T (%)		0,165	
D (mm)	101,6733	Def. vp (%)		0,029	
H (mm)	64,56	Def. el (%)		0,136	
Pagreg (pcm)	96,0	MF (MPa)		60,706	
Pb (pcm)	4,0				
D	2,483799				
Vv (5)	4,10186				
RBV (%)	69,27911				

TABELA 04 – Resultado do ensaio de fluência realizado com o corpo-de-prova 6A

ENSAIO DE FLUÊNCIA POR COMPRESSÃO UNIAXIAL ESTÁTICA					
Asfalto convencional			Corpo-de-prova: 6A		
Tempo (s)	Def. (%)	MF (MPa)	Tempo (s)	Def. (%)	MF (MPa)
30	0,127	78,824	1900	0,167	59,877
60	0,131	76,206	2000	0,168	59,645
90	0,136	73,483	2100	0,168	59,509
120	0,136	73,479	2400	0,170	58,901
150	0,138	72,364	2500	0,170	58,873
180	0,140	71,486	2700	0,171	58,601
210	0,141	70,732	2800	0,171	58,441
240	0,142	70,188	3000	0,172	58,117
270	0,144	69,515	3300	0,173	57,781
300	0,145	69,088	3600	0,174	57,584
360	0,147	68,096	DESCARREGAMENTO		
420	0,149	67,277	3630	0,081	124,224
480	0,150	66,605	3660	0,076	131,926
540	0,152	65,971	3690	0,073	136,240
600	0,153	65,486	3720	0,073	137,741
660	0,154	64,941	3750	0,072	139,470
720	0,155	64,553	3780	0,071	141,044
780	0,156	64,139	3810	0,070	142,248
840	0,157	63,810	3840	0,070	142,857
900	0,157	63,503	3870	0,070	143,885
960	0,158	63,180	3900	0,069	144,300
990	0,158	63,099	3960	0,069	145,985
1000	0,159	62,908	4020	0,068	147,275
1100	0,160	62,377	4080	0,068	148,148
1200	0,161	61,941	4140	0,067	148,810
1300	0,163	61,512	4200	0,067	149,477
1400	0,163	61,284	4260	0,067	149,925
1500	0,164	60,981	4320	0,067	150,150
1600	0,165	60,523	4380	0,066	151,057
1700	0,166	60,334	4440	0,066	151,286
1800	0,167	60,033	4500	0,066	151,745
DADOS DO CORPO-DE-PROVA ENSAIADO					
Mar (g)	1240,95	Tensão normal (Kgf/cm <sup>2</sup> )		1,0	
Mimersa (g)	717,1				
d	2,368903	Def.T (%)		0,174	
D (mm)	101,62667	Def.vp (%)		0,066	
H (mm)	64,99333	Def. el (%)		0,108	
Pagreg (pcm)	95,5	MF (MPa)		57,584	
Pb (pcm)	4,5				
D	2,465673				
Vv (5)	3,924668				
RBV (%)	72,50525				

TABELA 05 – Resultado do ensaio de fluência realizado com o corpo-de-prova 6.

ENSAIO DE FLUÊNCIA POR COMPRESSÃO UNIAXIAL ESTÁTICA					
Asfalto convencional			Corpo-de-prova: 6		
Tempo (s)	Def. (%)	MF (MPa)	Tempo (s)	Def. (%)	MF (MPa)
30	0,147	67,893	1900	0,204	49,014
60	0,153	65,257	2000	0,205	48,735
90	0,157	63,502	2100	0,206	48,459
120	0,161	61,940	2400	0,209	47,885
150	0,164	61,046	2500	0,210	47,697
180	0,166	60,147	2700	0,211	47,442
210	0,168	59,432	2800	0,212	47,274
240	0,170	58,807	3000	0,213	46,992
270	0,172	58,200	3300	0,215	46,555
300	0,173	57,821	3600	0,215	46,594
360	0,175	57,019	DESCARREGAMENTO		
420	0,178	56,254	3630	0,105	95,694
480	0,180	55,573	3660	0,099	100,604
540	0,182	55,094	3690	0,097	103,093
600	0,183	54,614	3720	0,096	104,712
660	0,185	54,085	3750	0,094	106,045
720	0,187	53,545	3780	0,093	107,066
780	0,188	53,214	3810	0,093	108,108
840	0,189	52,858	3840	0,092	108,578
900	0,190	52,573	3870	0,092	109,290
960	0,192	52,126	3900	0,091	110,011
990	0,192	52,079	3960	0,090	110,742
1000	0,192	51,979	4020	0,090	111,607
1100	0,194	51,580	4080	0,089	112,233
1200	0,196	51,058	4140	0,089	112,867
1300	0,197	50,659	4200	0,088	113,379
1400	0,199	50,353	4260	0,088	113,895
1500	0,200	50,096	4320	0,088	114,155
1600	0,201	49,714	4380	0,087	114,679
1700	0,202	49,395	4440	0,087	114,679
1800	0,203	49,161	4500	0,087	114,943
DADOS DO CORPO-DE-PROVA ENSAIADO					
Mar (g)	1232,87	Tensão normal (Kgf/cm <sup>2</sup> )		1,0	
Mimersa (g)	707,9				
d	2,348458	Def.T (%)		0,215	
D (mm)	101,55333	Def.vp (%)		0,087	
H (mm)	65,31333	Def. el (%)		0,128	
Pagreg (pcm)	95,5	MF (MPa)		46,594	
Pb (pcm)	4,5				
D	2,465673				
Vv (5)	4,753866				
RBV (%)	68,33737				

TABELA 06 – Resultado do ensaio de fluência realizado com o corpo-de-prova 5.

ENSAIO DE FLUÊNCIA POR COMPRESSÃO UNIAXIAL ESTÁTICA					
Asfalto convencional			Corpo-de-prova: 5		
Tempo (s)	Def. (%)	MF (MPa)	Tempo (s)	Def. (%)	MF (MPa)
30	0,142	70,225	1900	0,197	50,698
60	0,150	66,578	2000	0,198	50,437
90	0,153	65,326	2100	0,199	50,301
120	0,156	63,978	2400	0,201	49,853
150	0,159	62,923	2500	0,201	49,660
180	0,161	62,072	2700	0,202	49,453
210	0,163	61,374	2800	0,203	49,301
240	0,165	60,764	3000	0,203	49,199
270	0,166	60,078	3300	0,204	48,915
300	0,168	59,620	3600	0,206	48,481
360	0,170	58,691	DESCARREGAMENTO		
420	0,173	57,877	3630	0,096	104,167
480	0,175	57,121	3660	0,091	110,132
540	0,177	56,475	3690	0,089	112,108
600	0,179	55,889	3720	0,088	113,636
660	0,180	55,465	3750	0,087	115,207
720	0,181	55,115	3780	0,086	116,279
780	0,183	54,669	3810	0,085	117,096
840	0,184	54,246	3840	0,085	117,925
900	0,185	53,941	3870	0,084	118,624
960	0,186	53,664	3900	0,084	119,190
990	0,187	53,510	3960	0,083	119,904
1000	0,187	53,403	4020	0,083	120,919
1100	0,189	53,003	4080	0,082	121,655
1200	0,190	52,579	4140	0,082	122,399
1300	0,192	52,211	4200	0,081	122,850
1400	0,193	51,898	4260	0,081	123,305
1500	0,193	51,689	4320	0,081	123,916
1600	0,195	51,410	4380	0,081	124,224
1700	0,196	51,114	4440	0,080	124,844
1800	0,197	50,884	4500	0,080	125,156
DADOS DO CORPO-DE-PROVA ENSAIADO					
Mar (g)	1229,58	Tensão normal (Kgf/cm <sup>2</sup> )		1,0	
Mimersa (g)	709,2				
d	2,36285	Def.T(%)		0,206	
D (mm)	101,68	Def.vp (%)		0,08	
H (mm)	64,62	Def. el (%)		0,126	
Pagreg (pcm)	95,5	MF (MPa)		48,481	
Pb (pcm)	4,5				
D	2,465673				
Vv (5)	4,170162				
RBV (%)	71,22695				



TABELA 07 – Resultado do ensaio de fluência realizado com o corpo-de-prova 8A

ENSAIO DE FLUÊNCIA POR COMPRESSÃO UNIAXIAL ESTÁTICA					
Asfalto convencional			Corpo-de-prova: 8A		
Tempo (s)	Def. (%)	MF (MPa)	Tempo (s)	Def. (%)	MF (MPa)
30	0,289	34,558	1900	0,448	22,326
60	0,312	32,029	2000	0,450	22,198
90	0,323	30,984	2100	0,451	22,170
120	0,333	30,018	2400	0,457	21,901
150	0,341	29,336	2500	0,459	21,779
180	0,347	28,844	2700	0,462	21,667
210	0,353	28,335	2800	0,463	21,611
240	0,358	27,949	3000	0,466	21,454
270	0,362	27,597	3300	0,469	21,328
300	0,366	27,302	3600	0,477	20,967
360	0,373	26,776	DESCARREGAMENTO		
420	0,380	26,340	3630	0,320	31,221
480	0,386	25,924	3660	0,311	32,165
540	0,391	25,602	3690	0,306	32,701
600	0,395	25,299	3720	0,303	32,960
660	0,399	25,035	3750	0,301	33,179
720	0,403	24,832	3780	0,300	33,378
780	0,406	24,627	3810	0,298	33,523
840	0,409	24,423	3840	0,297	33,659
900	0,412	24,260	3870	0,296	33,784
960	0,416	24,046	3900	0,295	33,875
990	0,418	23,903	3960	0,294	34,048
1000	0,419	23,882	4020	0,292	34,200
1100	0,422	23,682	4080	0,291	34,317
1200	0,426	23,460	4140	0,291	34,423
1300	0,431	23,201	4200	0,290	34,518
1400	0,434	23,017	4260	0,289	34,590
1500	0,436	22,920	4320	0,288	34,686
1600	0,440	22,719	4380	0,288	34,758
1700	0,443	22,569	4440	0,287	34,831
1800	0,445	22,463	4500	0,287	34,880
DADOS DO CORPO-DE-PROVA ENSAIADO					
Mar (g)	1252,39	Tensão normal (Kgf/cm <sup>2</sup> )		1,0	
Mimersa (g)	724,2				
d	2,371098	Def. T (%)		0,477	
D (mm)	101,63333	Def.vp (%)		0,287	
H (mm)	65,52	Def. el (%)		0,19	
Pagreg (pcm)	95,0	MF (MPa)		20,967	
Pb (pcm)	5,0				
D	2,447809				
Vv (5)	3,133901				
RBV (%)	78,59954				

TABELA 08 – Resultado do ensaio de fluência realizado com o corpo-de-prova 7

ENSAIO DE FLUÊNCIA POR COMPRESSÃO UNIAXIAL ESTÁTICA					
Asfalto convencional			Corpo-de-prova: 7		
Tempo (s)	Def. (%)	MF (MPa)	Tempo (s)	Def. (%)	MF (MPa)
30	0,213	46,989	1900	0,300	33,320
60	0,222	44,997	2000	0,302	33,164
90	0,232	43,130	2100	0,303	33,010
120	0,238	42,075	2400	0,304	32,847
150	0,242	41,316	2500	0,305	32,802
180	0,246	40,623	2700	0,306	32,655
210	0,250	39,995	2800	0,305	32,807
240	0,253	39,569	3000	0,306	32,660
270	0,255	39,207	3300	0,307	32,533
300	0,257	38,859	3600	0,309	32,318
360	0,260	38,410	DESCARREGAMENTO		
420	0,264	37,907	3630	0,174	57,438
480	0,267	37,431	3660	0,162	61,614
540	0,270	37,056	3690	0,156	64,144
600	0,273	36,662	3720	0,153	65,531
660	0,275	36,321	3750	0,150	66,578
720	0,277	36,081	3780	0,148	67,385
780	0,279	35,839	3810	0,147	68,074
840	0,281	35,622	3840	0,146	68,587
900	0,282	35,428	3870	0,145	69,013
960	0,284	35,194	3900	0,144	69,444
990	0,284	35,159	3960	0,143	70,077
1000	0,284	35,162	4020	0,141	70,822
1100	0,287	34,865	4080	0,141	71,174
1200	0,289	34,602	4140	0,140	71,582
1300	0,291	34,338	4200	0,139	71,942
1400	0,293	34,161	4260	0,138	72,254
1500	0,295	33,925	4320	0,138	72,622
1600	0,296	33,766	4380	0,137	72,939
1700	0,298	33,601	4440	0,137	73,099
1800	0,299	33,432	4500	0,137	73,260
DADOS DO CORPO-DE-PROVA ENSAIADO					
Mar (g)	1241,06	Tensão normal (Kgf/cm <sup>2</sup> )		1,0	
Mimersa (g)	718,7				
d	2,375871	Def.T (%)		0,309	
D (mm)	101,74667	Def.vp (%)		0,137	
H (mm)	65,23333	Def. el (%)		0,172	
Pagreg (pcm)	95,0	MF (MPa)		32,318	
Pb (pcm)	5,0				
D	2,447809				
Vv (5)	2,938889				
RBV (%)	79,69293				

TABELA 09 – Resultado do ensaio de fluência realizado com o corpo-de-prova 03.

ENSAIO DE FLUÊNCIA POR COMPRESSÃO UNIAXIAL ESTÁTICA					
Asfalto convencional			Corpo-de-prova: 03		
Tempo (s)	Def. (%)	MF (MPa)	Tempo (s)	Def. (%)	MF (MPa)
30	0,260	38,499	1900	0,357	28,010
60	0,275	36,370	2000	0,358	27,920
90	0,286	34,971	2100	0,360	27,792
120	0,290	34,498	2400	0,361	27,667
150	0,295	33,925	2500	0,363	27,582
180	0,300	33,362	2700	0,364	27,451
210	0,303	32,984	2800	0,365	27,416
240	0,307	32,608	3000	0,367	27,231
270	0,309	32,362	3300	0,369	27,079
300	0,312	32,058	3600	0,371	26,952
360	0,316	31,682	DESCARREGAMENTO		
420	0,319	31,303	3630	0,221	45,188
480	0,323	30,992	3660	0,211	47,483
540	0,326	30,706	3690	0,206	48,567
600	0,329	30,399	3720	0,203	49,164
660	0,331	30,254	3750	0,202	49,628
720	0,333	30,050	3780	0,200	50,025
780	0,335	29,866	3810	0,199	50,302
840	0,337	29,669	3840	0,198	50,531
900	0,338	29,614	3870	0,197	50,761
960	0,340	29,432	3900	0,196	50,916
990	0,341	29,343	3960	0,195	51,282
1000	0,341	29,332	4020	0,194	51,520
1100	0,344	29,111	4080	0,193	51,760
1200	0,345	29,001	4140	0,193	51,921
1300	0,348	28,753	4200	0,192	52,083
1400	0,349	28,619	4260	0,191	52,274
1500	0,350	28,543	4320	0,191	52,356
1600	0,353	28,336	4380	0,191	52,493
1700	0,355	28,199	4440	0,190	52,632
1800	0,356	28,110	4500	0,190	52,715
DADOS DO CORPO-DE-PROVA ENSAIADO					
Mar (g)	1244,8	Tensão normal (Kgf/cm <sup>2</sup> )		1,0	
Mimersa (g)	721,7				
d	2,37966	Def.T (%)		0,371	
D (mm)	101,80667	Def.vp (%)		0,19	
H (mm)	64,99333	Def. el (%)		0,181	
Pagreg (pcm)	95,0	MF (MPa)		26,952	
Pb (pcm)	5,0				
D	2,447809				
Vv (5)	2,784111				
RBV (%)	80,57939				

TABELA 10 – Resultado do ensaio de fluência realizado com o corpo-de-prova 10.

ENSAIO DE FLUÊNCIA POR COMPRESSÃO UNIAXIAL ESTÁTICA					
Asfalto convencional			Corpo-de-prova: 10		
Tempo (s)	Def. (%)	MF (MPa)	Tempo (s)	Def. (%)	MF (MPa)
30	0,460	21,752	1900	0,717	13,946
60	0,500	19,992	2000	0,718	13,934
90	0,522	19,155	2100	0,722	13,841
120	0,532	18,809	2400	0,727	13,759
150	0,547	18,269	2500	0,728	13,739
180	0,557	17,949	2700	0,732	13,660
210	0,566	17,663	2800	0,732	13,653
240	0,575	17,387	3000	0,736	13,583
270	0,583	17,142	3300	0,739	13,523
300	0,589	16,971	3600	0,742	13,472
360	0,601	16,639	DESCARREGAMENTO		
420	0,613	16,317	3630	0,563	17,771
480	0,623	16,050	3660	0,551	18,152
540	0,631	15,854	3690	0,545	18,362
600	0,639	15,659	3720	0,541	18,481
660	0,645	15,497	3750	0,538	18,587
720	0,651	15,352	3780	0,536	18,671
780	0,657	15,223	3810	0,534	18,730
840	0,662	15,103	3840	0,532	18,786
900	0,667	14,989	3870	0,531	18,836
960	0,672	14,882	3900	0,530	18,879
990	0,674	14,831	3960	0,528	18,943
1000	0,675	14,809	4020	0,526	19,008
1100	0,682	14,670	4080	0,525	19,051
1200	0,687	14,547	4140	0,523	19,106
1300	0,693	14,432	4200	0,522	19,142
1400	0,697	14,342	4260	0,521	19,186
1500	0,701	14,258	4320	0,520	19,216
1600	0,707	14,149	4380	0,519	19,253
1700	0,710	14,090	4440	0,519	19,283
1800	0,712	14,037	4500	0,518	19,309
DADOS DO CORPO-DE-PROVA ENSAIADO					
Mar (g)	1240,5	Tensão normal (Kgf/cm <sup>2</sup> )		1,0	
Mimersa (g)	717,3				
d	2,370986	Def.T (%)		0,742	
D (mm)	101,90667	Def.vp (%)		0,518	
H (mm)	65,47333	Def. el (%)		0,224	
Pagreg (pcm)	94,5	MF (MPa)		13,472	
Pb (pcm)	5,5				
D	2,430203				
Vv (5)	2,436704				
RBV (%)	83,86001				

TABELA 11 – Resultado do ensaio de fluência realizado com o corpo-de-prova 05.

ENSAIO DE FLUÊNCIA POR COMPRESSÃO UNIAXIAL ESTÁTICA					
Asfalto convencional			Corpo-de-prova: 05		
Tempo (s)	Def. (%)	MF (MPa)	Tempo (s)	Def. (%)	MF (MPa)
30	0,441	22,669	1900	0,710	14,094
60	0,484	20,656	2000	0,712	14,054
90	0,512	19,547	2100	0,716	13,965
120	0,531	18,830	2400	0,722	13,852
150	0,546	18,321	2500	0,725	13,788
180	0,558	17,911	2700	0,729	13,713
210	0,568	17,592	2800	0,728	13,729
240	0,577	17,329	3000	0,733	13,639
270	0,584	17,110	3300	0,739	13,527
300	0,592	16,897	3600	0,748	13,369
360	0,604	16,554	DESCARREGAMENTO		
420	0,614	16,285	3630	0,587	17,047
480	0,623	16,062	3660	0,576	17,370
540	0,630	15,865	3690	0,570	17,538
600	0,637	15,698	3720	0,567	17,649
660	0,643	15,554	3750	0,564	17,737
720	0,648	15,432	3780	0,562	17,803
780	0,653	15,309	3810	0,560	17,854
840	0,658	15,202	3840	0,559	17,902
900	0,662	15,097	3870	0,557	17,940
960	0,666	15,009	3900	0,556	17,982
990	0,669	14,944	3960	0,554	18,044
1000	0,671	14,901	4020	0,553	18,090
1100	0,677	14,773	4080	0,551	18,136
1200	0,680	14,707	4140	0,550	18,175
1300	0,686	14,582	4200	0,549	18,212
1400	0,691	14,479	4260	0,548	18,238
1500	0,695	14,396	4320	0,547	18,272
1600	0,697	14,344	4380	0,547	18,298
1700	0,701	14,271	4440	0,546	18,322
1800	0,704	14,201	4500	0,545	18,342
DADOS DO CORPO-DE-PROVA ENSAIADO					
Mar (g)	1243,74	Tensão normal (Kgf/cm <sup>2</sup> )		1,0	
Mimersa (g)	716,7				
d	2,359859	Def.T (%)		0,748	
D (mm)	101,96667	Def.vp (%)		0,545	
H (mm)	66,04	Def. el (%)		0,203	
Pagreg (pcm)	94,5	MF (MPa)		13,369	
Pb (pcm)	5,5				
D	2,430203				
Vv (5)	2,894583				
RBV (%)	81,32017				

TABELA 12 – Resultado do ensaio de fluência realizado com o corpo-de-prova 04.

ENSAIO DE FLUÊNCIA POR COMPRESSÃO UNIAXIAL ESTÁTICA					
Asfalto convencional			Corpo-de-prova: 04		
Tempo (s)	Def. (%)	MF (MPa)	Tempo (s)	Def. (%)	MF (MPa)
30	0,280	35,748	1900	0,371	26,988
60	0,292	34,299	2000	0,371	26,958
90	0,295	33,854	2100	0,372	26,847
120	0,303	33,037	2400	0,377	26,491
150	0,307	32,534	2500	0,379	26,400
180	0,311	32,133	2700	0,378	26,431
210	0,314	31,807	2800	0,380	26,333
240	0,317	31,510	3000	0,382	26,195
270	0,320	31,214	3300	0,383	26,086
300	0,323	30,993	3600	0,388	25,740
360	0,327	30,610	DESCARREGAMENTO		
420	0,330	30,300	3630	0,219	45,746
480	0,334	29,974	3660	0,207	48,356
540	0,336	29,725	3690	0,201	49,850
600	0,339	29,485	3720	0,198	50,607
660	0,342	29,279	3750	0,195	51,282
720	0,345	29,026	3780	0,193	51,813
780	0,346	28,930	3810	0,191	52,274
840	0,348	28,766	3840	0,190	52,604
900	0,350	28,603	3870	0,189	52,966
960	0,351	28,508	3900	0,188	53,248
990	0,352	28,423	3960	0,186	53,763
1000	0,352	28,391	4020	0,185	54,201
1100	0,355	28,146	4080	0,183	54,615
1200	0,357	28,046	4140	0,182	54,915
1300	0,359	27,829	4200	0,181	55,188
1400	0,361	27,666	4260	0,180	55,463
1500	0,364	27,474	4320	0,180	55,679
1600	0,365	27,400	4380	0,179	55,897
1700	0,367	27,252	4440	0,178	56,148
1800	0,368	27,161	4500	0,178	56,306
DADOS DO CORPO-DE-PROVA ENSAIADO					
Mar (g)	1241,8	Tensão normal (Kgf/cm <sup>2</sup> )		1,0	
Mimersa (g)	718,0				
d	2,370752	Def. T (%)		0,388	
D (mm)	101,93333	Def. vp (%)		0,178	
H (mm)	65,54667	Def. el (%)		0,210	
Pagreg (pcm)	94,5	MF (MPa)		25,740	
Pb (pcm)	5,5				
D	2,430203				
Vv (5)	2,446334				
RBV (%)	83,80521				

TABELA 13 – Resultado do ensaio de fluência realizado com o corpo-de-prova 14C.

ENSAIO DE FLUÊNCIA POR COMPRESSÃO UNIAXIAL ESTÁTICA					
Asfalto convencional			Corpo-de-prova: 14C		
Tempo (s)	Def. (%)	MF (MPa)	Tempo (s)	Def. (%)	MF (MPa)
30	0,511	19,573	1900	0,823	12,147
60	0,553	18,089	2000	0,826	12,100
90	0,582	17,181	2100	0,830	12,053
120	0,605	16,529	2400	0,838	11,932
150	0,624	16,022	2500	0,841	11,897
180	0,637	15,706	2700	0,845	11,833
210	0,649	15,401	2800	0,847	11,802
240	0,661	15,136	3000	0,851	11,748
270	0,670	14,933	3300	0,858	11,656
300	0,678	14,758	3600	0,863	11,588
360	0,691	14,463	DESCARREGAMENTO		
420	0,703	14,223	3630	0,597	16,753
480	0,713	14,023	3660	0,576	17,361
540	0,723	13,838	3690	0,565	17,687
600	0,730	13,692	3720	0,559	17,889
660	0,738	13,557	3750	0,554	18,038
720	0,748	13,378	3780	0,551	18,162
780	0,751	13,321	3810	0,548	18,262
840	0,757	13,213	3840	0,545	18,349
900	0,763	13,109	3870	0,543	18,423
960	0,768	13,024	3900	0,541	18,481
990	0,773	12,929	3960	0,538	18,584
1000	0,775	12,909	4020	0,536	18,664
1100	0,780	12,813	4080	0,534	18,737
1200	0,790	12,653	4140	0,532	18,793
1300	0,797	12,554	4200	0,531	18,847
1400	0,802	12,476	4260	0,529	18,889
1500	0,807	12,395	4320	0,528	18,932
1600	0,812	12,317	4380	0,527	18,972
1700	0,815	12,271	4440	0,526	19,011
1800	0,820	12,199	4500	0,525	19,044
DADOS DO CORPO-DE-PROVA ENSAIADO					
Mar (g)	1248,49	Tensão normal (Kgf/cm <sup>2</sup> )		1,0	
Mimersa (g)	715,8				
d	2,343746	Def.T (%)		0,863	
D (mm)	101,80667	Def.vp (%)		0,525	
H (mm)	67,82667	Def. el (%)		0,338	
Pagreg (pcm)	94,0	MF (MPa)		11,588	
Pb (pcm)	6,0				
D	2,412848				
Vv (5)	2,863931				
RBV (%)	82,66052				

TABELA 14 – Resultado do ensaio de fluência realizado com o corpo-de-prova 15B.

ENSAIO DE FLUÊNCIA POR COMPRESSÃO UNIAXIAL ESTÁTICA					
Asfalto convencional			Corpo-de-prova: 15B		
Tempo (s)	Def. (%)	MF (MPa)	Tempo (s)	Def. (%)	MF (MPa)
30	0,456	21,940	1900	0,809	12,361
60	0,500	19,997	2000	0,814	12,290
90	0,532	18,801	2100	0,818	12,221
120	0,556	18,002	2400	0,829	12,058
150	0,574	17,430	2500	0,835	11,970
180	0,590	16,959	2700	0,837	11,946
210	0,602	16,605	2800	0,845	11,829
240	0,614	16,275	3000	0,850	11,766
270	0,625	16,004	3300	0,857	11,671
300	0,633	15,794	3600	0,869	11,509
360	0,651	15,365	DESCARREGAMENTO		
420	0,665	15,034	3630	0,637	15,708
480	0,679	14,721	3660	0,622	16,067
540	0,689	14,515	3690	0,615	16,268
600	0,699	14,301	3720	0,610	16,383
660	0,707	14,139	3750	0,607	16,472
720	0,715	13,994	3780	0,605	16,543
780	0,724	13,806	3810	0,602	16,600
840	0,732	13,655	3840	0,601	16,642
900	0,737	13,561	3870	0,600	16,678
960	0,744	13,443	3900	0,598	16,711
990	0,746	13,403	3960	0,597	16,762
1000	0,748	13,367	4020	0,595	16,810
1100	0,755	13,248	4080	0,594	16,844
1200	0,765	13,077	4140	0,592	16,880
1300	0,771	12,969	4200	0,591	16,909
1400	0,780	12,829	4260	0,590	16,938
1500	0,783	12,771	4320	0,590	16,961
1600	0,792	12,625	4380	0,589	16,984
1700	0,798	12,534	4440	0,588	17,007
1800	0,804	12,431	4500	0,588	17,018
DADOS DO CORPO-DE-PROVA ENSAIADO					
Mar (g)	1243,82	Tensão normal (Kgf/cm <sup>2</sup> )		1,0	
Mimersa (g)	713,7				
d	2,346299	Def.T (%)		0,869	
D (mm)	101,84	Def.vp (%)		0,588	
H (mm)	66,74667	Def. el (%)		0,281	
Pagreg (pcm)	94,00	MF (MPa)		11,509	
Pb (pcm)	6,00				
D	2,412848				
Vv (5)	2,75812				
RBV (%)	83,2087				



TABELA 15 – Resultado do ensaio de fluência realizado com o corpo-de-prova 09.

ENSAIO DE FLUÊNCIA POR COMPRESSÃO UNIAXIAL ESTÁTICA					
Asfalto convencional			Corpo-de-prova: 09		
Tempo (s)	Def. (%)	MF (MPa)	Tempo (s)	Def. (%)	MF (MPa)
30	0,382	26,176	1900	0,606	16,498
60	0,411	24,352	2000	0,609	16,433
90	0,421	23,769	2100	0,613	16,326
120	0,440	22,751	2400	0,621	16,113
150	0,450	22,228	2500	0,624	16,036
180	0,460	21,753	2700	0,627	15,939
210	0,468	21,360	2800	0,630	15,880
240	0,476	21,012	3000	0,634	15,784
270	0,482	20,768	3300	0,638	15,664
300	0,487	20,541	3600	0,637	15,696
360	0,497	20,108	DESCARREGAMENTO		
420	0,507	19,725	3630	0,422	23,708
480	0,515	19,434	3660	0,409	24,444
540	0,522	19,153	3690	0,403	24,814
600	0,529	18,900	3720	0,399	25,050
660	0,534	18,714	3750	0,396	25,227
720	0,541	18,490	3780	0,394	25,361
780	0,546	18,306	3810	0,393	25,465
840	0,552	18,122	3840	0,391	25,556
900	0,556	17,990	3870	0,390	25,628
960	0,562	17,801	3900	0,389	25,694
990	0,562	17,783	3960	0,388	25,800
1000	0,563	17,753	4020	0,386	25,900
1100	0,570	17,557	4080	0,385	25,974
1200	0,575	17,396	4140	0,384	26,048
1300	0,581	17,224	4200	0,383	26,123
1400	0,586	17,055	4260	0,382	26,164
1500	0,591	16,930	4320	0,382	26,205
1600	0,594	16,834	4380	0,381	26,254
1700	0,599	16,692	4440	0,380	26,288
1800	0,602	16,601	4500	0,380	26,330
DADOS DO CORPO-DE-PROVA ENSAIADO					
Mar (g)	1255,06	Tensão normal (Kgf/cm <sup>2</sup> )		1,0	
Mimersa (g)	722,00				
d	2,354444	Def. T (%)		0,637	
D (mm)	101,76667	Def.vp (%)		0,380	
H (mm)	66,90667	Def. el (%)		0,257	
Pagreg (pcm)	94,0	MF (MPa)		15,696	
Pb (pcm)	6,0				
D	2,412848				
Vv (5)	2,420543				
RBV (%)	84,99888				

TABELA 16 – Resultado do ensaio de fluência realizado com o corpo-de-prova P1B.

ENSAIO DE FLUÊNCIA POR COMPRESSÃO UNIAXIAL ESTÁTICA					
Asfalto modificado			Corpo-de-prova: P1B		
Tempo (s)	Def. (%)	MF (MPa)	Tempo (s)	Def. (%)	MF (MPa)
30	0,184	54,225	1900	0,252	39,701
60	0,194	51,579	2000	0,253	39,510
90	0,198	50,443	2100	0,254	39,395
120	0,203	49,221	2400	0,255	39,192
150	0,207	48,334	2500	0,256	39,115
180	0,210	47,517	2700	0,257	38,940
210	0,213	46,866	2800	0,256	39,000
240	0,216	46,233	3000	0,259	38,621
270	0,219	45,754	3300	0,260	38,421
300	0,220	45,440	3600	0,261	38,254
360	0,223	44,748	DESCARREGAMENTO		
420	0,226	44,337	3630	0,155	64,558
480	0,229	43,741	3660	0,148	67,659
540	0,230	43,492	3690	0,145	69,109
600	0,233	42,991	3720	0,142	70,225
660	0,234	42,651	3750	0,140	71,225
720	0,236	42,404	3780	0,139	71,942
780	0,237	42,129	3810	0,138	72,516
840	0,239	41,868	3840	0,137	73,099
900	0,240	41,631	3870	0,136	73,638
960	0,241	41,447	3900	0,135	74,019
990	0,241	41,430	3960	0,134	74,738
1000	0,242	41,395	4020	0,133	75,301
1100	0,243	41,116	4080	0,132	75,930
1200	0,245	40,833	4140	0,131	76,511
1300	0,246	40,635	4200	0,130	76,864
1400	0,247	40,419	4260	0,129	77,280
1500	0,248	40,269	4320	0,129	77,760
1600	0,249	40,138	4380	0,128	78,003
1700	0,250	39,939	4440	0,128	78,309
1800	0,251	39,802	4500	0,127	78,678
DADOS DO CORPO-DE-PROVA ENSAIADO					
Mar (g)	1243,32	Tensão normal (Kgf/cm <sup>2</sup> )		1,0	
Mimersa (g)	716,1				
d	2,358257	Def. T (%)		0,261	
D (mm)	101,6133	Def. vp (%)		0,127	
H (mm)	65,42667	Def. el (%)		0,134	
Pagreg (pcm)	96,0	MF (MPa)		38,254	
Pb (pcm)	4,0				
D	2,481452				
Vv (5)	4,964658				
RBV (%)	65,06892				

TABELA 17 – Resultado do ensaio de fluência realizado com o corpo-de-prova P3A

ENSAIO DE FLUÊNCIA POR COMPRESSÃO UNIAXIAL ESTÁTICA					
Asfalto modificado			Corpo-de-prova: P3A		
Tempo (s)	Def. (%)	MF (MPa)	Tempo (s)	Def. (%)	MF (MPa)
30	0,194	51,428	1900	0,270	37,013
60	0,205	48,697	2000	0,271	36,881
90	0,210	47,714	2100	0,272	36,778
120	0,215	46,564	2400	0,273	36,573
150	0,218	45,794	2500	0,274	36,480
180	0,221	45,149	2700	0,275	36,335
210	0,225	44,414	2800	0,275	36,370
240	0,228	43,858	3000	0,276	36,211
270	0,230	43,541	3300	0,277	36,051
300	0,232	43,104	3600	0,279	35,867
360	0,235	42,525	DESCARREGAMENTO		
420	0,238	42,073	3630	0,173	57,770
480	0,241	41,463	3660	0,166	60,241
540	0,244	40,982	3690	0,162	61,843
600	0,246	40,594	3720	0,160	62,617
660	0,248	40,267	3750	0,158	63,412
720	0,251	39,906	3780	0,157	63,898
780	0,252	39,649	3810	0,155	64,475
840	0,254	39,364	3840	0,154	64,851
900	0,256	39,117	3870	0,154	65,147
960	0,257	38,939	3900	0,153	65,531
990	0,258	38,818	3960	0,151	66,269
1000	0,257	38,838	4020	0,150	66,711
1100	0,261	38,381	4080	0,149	67,114
1200	0,262	38,114	4140	0,148	67,522
1300	0,264	37,840	4200	0,147	67,889
1400	0,266	37,620	4260	0,147	68,259
1500	0,267	37,480	4320	0,146	68,587
1600	0,268	37,297	4380	0,145	68,776
1700	0,269	37,189	4440	0,145	69,061
1800	0,270	37,054	4500	0,145	69,204
DADOS DO CORPO-DE-PROVA ENSAIADO					
Mar (g)	1237,74	Tensão normal (Kgf/cm <sup>2</sup> )		1,0	
Mimersa (g)	711,2				
d	2,350705	Def. T (%)		0,279	
D (mm)	101,59333	Def.vp (%)		0,145	
H (mm)	65,56	Def. el (%)		0,134	
Pagreg (pcm)	96,0	MF (MPa)		35,867	
Pb (pcm)	4,0				
D	2,481452				
Vv (5)	5,268992				
RBV (%)	63,63062				

TABELA 18 – Resultado do ensaio de fluência realizado com o corpo-de-prova P3.

ENSAIO DE FLUÊNCIA POR COMPRESSÃO UNIAXIAL ESTÁTICA					
Asfalto modificado			Corpo-de-prova: P3		
Tempo (s)	Def. (%)	MF (MPa)	Tempo (s)	Def. (%)	MF (MPa)
30	0,162	61,586	1900	0,227	44,145
60	0,171	58,640	2000	0,227	43,993
90	0,176	56,814	2100	0,229	43,704
120	0,180	55,514	2400	0,231	43,325
150	0,183	54,506	2500	0,232	43,095
180	0,186	53,682	2700	0,234	42,770
210	0,189	52,982	2800	0,235	42,563
240	0,191	52,471	3000	0,236	42,355
270	0,193	51,839	3300	0,238	42,051
300	0,195	51,366	3600	0,239	41,777
360	0,198	50,506	DESCARREGAMENTO		
420	0,201	49,768	3630	0,144	69,638
480	0,204	49,089	3660	0,136	73,692
540	0,206	48,527	3690	0,132	75,930
600	0,209	47,923	3720	0,129	77,821
660	0,210	47,571	3750	0,126	79,239
720	0,212	47,110	3780	0,124	80,386
780	0,214	46,777	3810	0,123	81,367
840	0,214	46,658	3840	0,122	82,102
900	0,215	46,449	3870	0,121	82,850
960	0,216	46,208	3900	0,120	83,472
990	0,217	46,064	3960	0,118	84,818
1000	0,217	46,075	4020	0,117	85,837
1100	0,218	45,795	4080	0,115	86,730
1200	0,220	45,446	4140	0,114	87,413
1300	0,221	45,334	4200	0,114	88,028
1400	0,222	45,028	4260	0,113	88,574
1500	0,223	44,842	4320	0,112	89,206
1600	0,224	44,718	4380	0,111	89,767
1700	0,225	44,513	4440	0,111	90,253
1800	0,226	44,272	4500	0,110	90,580
DADOS DO CORPO-DE-PROVA ENSAIADO					
Mar (g)	1243,44	Tensão normal (Kgf/cm <sup>2</sup> )		1,0	
Mimersa (g)	717,9				
d	2,366024	Def. T (%)		0,239	
D (mm)	101,64	Def. vp (%)		0,11	
H (mm)	65,1	Def. el (%)		0,129	
Pagreg (pcm)	96,0	MF (MPa)		41,777	
Pb (pcm)	4,0				
D	2,481452				
Vv (5)	4,651655				
RBV (%)	66,60735				

TABELA 19 – Resultado do ensaio de fluência realizado com o corpo-de-prova P6C.

ENSAIO DE FLUÊNCIA POR COMPRESSÃO UNIAXIAL ESTÁTICA					
Asfalto modificado			Corpo-de-prova: P6C		
Tempo (s)	Def. (%)	MF (MPa)	Tempo (s)	Def. (%)	MF (MPa)
30	0,210	47,515	1900	0,298	33,601
60	0,224	44,670	2000	0,299	33,478
90	0,228	43,794	2100	0,300	33,328
120	0,236	42,352	2400	0,302	33,067
150	0,241	41,443	2500	0,303	32,955
180	0,245	40,825	2700	0,305	32,775
210	0,248	40,253	2800	0,306	32,719
240	0,251	39,809	3000	0,307	32,619
270	0,254	39,432	3300	0,308	32,423
300	0,256	39,103	3600	0,313	31,969
360	0,260	38,454	DESCARREGAMENTO		
420	0,264	37,876	3630	0,207	48,286
480	0,267	37,421	3660	0,200	50,100
540	0,270	37,031	3690	0,196	50,994
600	0,272	36,766	3720	0,194	51,680
660	0,274	36,469	3750	0,192	52,219
720	0,276	36,212	3780	0,190	52,576
780	0,278	35,971	3810	0,189	52,938
840	0,280	35,757	3840	0,188	53,248
900	0,281	35,551	3870	0,187	53,533
960	0,283	35,364	3900	0,186	53,792
990	0,284	35,263	3960	0,185	54,201
1000	0,284	35,252	4020	0,183	54,585
1100	0,286	35,010	4080	0,182	54,915
1200	0,288	34,757	4140	0,181	55,157
1300	0,289	34,568	4200	0,181	55,402
1400	0,291	34,331	4260	0,180	55,617
1500	0,292	34,221	4320	0,179	55,835
1600	0,294	34,006	4380	0,179	56,022
1700	0,296	33,823	4440	0,178	56,180
1800	0,296	33,763	4500	0,178	56,243
DADOS DO CORPO-DE-PROVA ENSAIADO					
Mar (g)	1236,21	Tensão normal (Kgf/cm <sup>2</sup> )		1,0	
Mimersa (g)	715,5				
d	2,374085	Def.T(%)		0,313	
D (mm)	101,61333	Def.vp (%)		0,178	
H (mm)	65,26	Def. el (%)		0,135	
Pagreg (pcm)	95,5	MF (MPa)		31,969	
Pb (pcm)	4,5				
D	2,463071				
Vv (5)	3,612811				
RBV (%)	74,35307				

TABELA 20 – Resultado do ensaio de fluência realizado com o corpo-de-prova P4C.

ENSAIO DE FLUÊNCIA POR COMPRESSÃO UNIAXIAL ESTÁTICA					
Asfalto modificado			Corpo-de-prova: P4C		
Tempo (s)	Def. (%)	MF (MPa)	Tempo (s)	Def. (%)	MF (MPa)
30	0,212	47,146	1900	0,296	33,797
60	0,225	44,464	2000	0,297	33,628
90	0,231	43,324	2100	0,299	33,479
120	0,236	42,356	2400	0,299	33,396
150	0,241	41,468	2500	0,300	33,282
180	0,245	40,856	2700	0,302	33,088
210	0,248	40,382	2800	0,303	33,028
240	0,250	39,973	3000	0,305	32,771
270	0,253	39,579	3300	0,307	32,587
300	0,255	39,284	3600	0,312	32,094
360	0,259	38,577	DESCARREGAMENTO		
420	0,263	38,082	3630	0,204	48,996
480	0,265	37,739	3660	0,197	50,761
540	0,268	37,272	3690	0,193	51,894
600	0,271	36,963	3720	0,191	52,493
660	0,273	36,693	3750	0,189	53,050
720	0,275	36,422	3780	0,187	53,533
780	0,276	36,243	3810	0,186	53,879
840	0,278	36,025	3840	0,184	54,230
900	0,279	35,833	3870	0,183	54,526
960	0,281	35,637	3900	0,183	54,795
990	0,281	35,554	3960	0,181	55,279
1000	0,282	35,520	4020	0,180	55,617
1100	0,284	35,247	4080	0,179	55,960
1200	0,286	35,017	4140	0,178	56,275
1300	0,287	34,822	4200	0,177	56,529
1400	0,289	34,586	4260	0,176	56,754
1500	0,291	34,326	4320	0,176	56,980
1600	0,292	34,244	4380	0,175	57,176
1700	0,293	34,144	4440	0,174	57,372
1800	0,294	33,975	4500	0,174	57,571
DADOS DO CORPO-DE-PROVA ENSAIADO					
Mar (g)	1234,02	Tensão normal (Kgf/cm <sup>2</sup> )		1,0	
Mimersa (g)	711,1				
d	2,359864	Def.T (%)		0,312	
D (mm)	101,59333	Def.vp (%)		0,174	
H (mm)	65,28	Def. el (%)		0,138	
Pagreg (pcm)	95,5	MF (MPa)		32,094	
Pb (pcm)	4,5				
D	2,463071				
Vv (5)	4,190201				
RBV (%)	71,30267				

TABELA 21 – Resultado do ensaio de fluência realizado com o corpo-de-prova P5B.

ENSAIO DE FLUÊNCIA POR COMPRESSÃO UNIAXIAL ESTÁTICA					
Asfalto modificado			Corpo-de-prova: P5B		
Tempo (s)	Def. (%)	MF (MPa)	Tempo (s)	Def. (%)	MF (MPa)
30	0,180	55,549	1900	0,260	38,426
60	0,187	53,426	2000	0,261	38,280
90	0,195	51,169	2100	0,262	38,100
120	0,200	49,942	2400	0,265	37,673
150	0,204	48,947	2500	0,266	37,557
180	0,207	48,202	2700	0,268	37,379
210	0,210	47,551	2800	0,269	37,227
240	0,213	46,944	3000	0,270	37,074
270	0,216	46,349	3300	0,272	36,768
300	0,218	45,956	3600	0,275	36,368
360	0,222	44,960	DESCARREGAMENTO		
420	0,226	44,224	3630	0,165	60,569
480	0,230	43,524	3660	0,158	63,291
540	0,232	43,050	3690	0,154	64,893
600	0,235	42,574	3720	0,152	65,617
660	0,237	42,258	3750	0,151	66,445
720	0,239	41,865	3780	0,149	67,114
780	0,240	41,613	3810	0,148	67,659
840	0,242	41,247	3840	0,147	68,166
900	0,244	41,017	3870	0,146	68,493
960	0,245	40,749	3900	0,145	68,871
990	0,246	40,635	3960	0,144	69,589
1000	0,246	40,626	4020	0,143	70,175
1100	0,248	40,303	4080	0,142	70,572
1200	0,251	39,917	4140	0,141	71,073
1300	0,252	39,646	4200	0,140	71,429
1400	0,254	39,418	4260	0,139	71,839
1500	0,255	39,177	4320	0,139	72,150
1600	0,257	38,954	4380	0,138	72,464
1700	0,258	38,777	4440	0,138	72,727
1800	0,259	38,640	4500	0,137	72,939
DADOS DO CORPO-DE-PROVA ENSAIADO					
Mar (g)	1239,64	Tensão normal (Kgf/cm <sup>2</sup> )		1,0	
Mimersa (g)	714,4				
d	2,36014	Def.T(%)		0,275	
D (mm)	101,56	Def.vp (%)		0,137	
H (mm)	65,4	Def. el (%)		0,138	
Pagreg (pcm)	95,5	MF (MPa)		36,368	
Pb (pcm)	4,5				
D	2,463071				
Vv (5)	4,178984				
RBV (%)	71,35989				

TABELA 22 – Resultado do ensaio de fluência realizado com o corpo-de-prova P9B.

ENSAIO DE FLUÊNCIA POR COMPRESSÃO UNIAXIAL ESTÁTICA					
Asfalto modificado			Corpo-de-prova: P9B		
Tempo (s)	Def. (%)	MF (MPa)	Tempo (s)	Def. (%)	MF (MPa)
30	0,300	33,320	1900	0,437	22,897
60	0,324	30,820	2000	0,439	22,760
90	0,338	29,583	2100	0,439	22,793
120	0,347	28,793	2400	0,443	22,570
150	0,355	28,137	2500	0,446	22,441
180	0,361	27,728	2700	0,445	22,463
210	0,366	27,292	2800	0,447	22,387
240	0,371	26,968	3000	0,449	22,283
270	0,375	26,670	3300	0,450	22,204
300	0,378	26,436	3600	0,456	21,936
360	0,384	26,033	DESCARREGAMENTO		
420	0,389	25,679	3630	0,336	29,789
480	0,394	25,410	3660	0,326	30,722
540	0,398	25,154	3690	0,320	31,250
600	0,401	24,933	3720	0,317	31,596
660	0,404	24,781	3750	0,314	31,888
720	0,407	24,591	3780	0,311	32,113
780	0,409	24,454	3810	0,310	32,310
840	0,413	24,241	3840	0,308	32,478
900	0,416	24,032	3870	0,307	32,616
960	0,416	24,044	3900	0,306	32,733
990	0,417	23,956	3960	0,304	32,938
1000	0,418	23,911	4020	0,302	33,135
1100	0,421	23,769	4080	0,300	33,300
1200	0,424	23,604	4140	0,299	33,456
1300	0,425	23,552	4200	0,298	33,580
1400	0,428	23,360	4260	0,297	33,704
1500	0,431	23,184	4320	0,296	33,818
1600	0,431	23,182	4380	0,295	33,910
1700	0,434	23,043	4440	0,294	34,002
1800	0,435	23,015	4500	0,293	34,095
DADOS DO CORPO-DE-PROVA ENSAIADO					
Mar (g)	1247,41	Tensão normal (Kgf/cm <sup>2</sup> )		1,0	
Mimersa (g)	721,7				
d	2,37281	Def.T (%)		0,456	
D (mm)	101,5	Def.vp (%)		0,293	
H (mm)	65,68	Def. el (%)		0,163	
Pagreg (pcm)	95,0	MF (MPa)		21,936	
Pb (pcm)	5,0				
D	2,444961				
Vv (5)	2,951011				
RBV (%)	79,76325				



TABELA 23 – Resultado do ensaio de fluência realizado com o corpo-de-prova P8B.

ENSAIO DE FLUÊNCIA POR COMPRESSÃO UNIAXIAL ESTÁTICA					
Asfalto modificado			Corpo-de-prova: P8B		
Tempo (s)	Def. (%)	MF (MPa)	Tempo (s)	Def. (%)	MF (MPa)
30	0,340	29,451	1900	0,486	20,555
60	0,365	27,427	2000	0,489	20,451
90	0,380	26,317	2100	0,488	20,483
120	0,391	25,591	2400	0,494	20,251
150	0,399	25,077	2500	0,496	20,151
180	0,405	24,674	2700	0,495	20,200
210	0,411	24,351	2800	0,496	20,160
240	0,415	24,076	3000	0,499	20,057
270	0,421	23,759	3300	0,500	20,001
300	0,425	23,542	3600	0,502	19,932
360	0,432	23,139	DESCARREGAMENTO		
420	0,438	22,830	3630	0,365	27,397
480	0,442	22,608	3660	0,352	28,409
540	0,446	22,441	3690	0,346	28,927
600	0,450	22,234	3720	0,342	29,283
660	0,453	22,092	3750	0,338	29,595
720	0,456	21,938	3780	0,335	29,824
780	0,458	21,814	3810	0,333	30,039
840	0,461	21,704	3840	0,331	30,230
900	0,463	21,598	3870	0,329	30,358
960	0,465	21,497	3900	0,328	30,488
990	0,467	21,421	3960	0,326	30,713
1000	0,467	21,391	4020	0,324	30,893
1100	0,469	21,301	4080	0,322	31,066
1200	0,472	21,186	4140	0,320	31,211
1300	0,475	21,045	4200	0,319	31,338
1400	0,478	20,910	4260	0,318	31,456
1500	0,479	20,874	4320	0,317	31,556
1600	0,481	20,779	4380	0,316	31,646
1700	0,483	20,718	4440	0,315	31,756
1800	0,485	20,639	4500	0,314	31,837
DADOS DO CORPO-DE-PROVA ENSAIADO					
Mar (g)	1248,27	Tensão normal (Kgf/cm <sup>2</sup> )		1,0	
Mimersa (g)	722,4				
d	2,373724	Def. T (%)		0,502	
D (mm)	101,74667	Def.vp (%)		0,314	
H (mm)	65,27333	Def. el (%)		0,188	
Pagreg (pcm)	95,0	MF (MPa)		19,932	
Pb (pcm)	5,0				
D	2,444961				
Vv (5)	2,913651				
RBV (%)	79,97429				

TABELA 24 – Resultado do ensaio de fluência realizado com o corpo-de-prova P9A

ENSAIO DE FLUÊNCIA POR COMPRESSÃO UNIAXIAL ESTÁTICA					
Asfalto modificado			Corpo-de-prova: P9A		
Tempo (s)	Def. (%)	MF (MPa)	Tempo (s)	Def. (%)	MF (MPa)
30	0,330	30,339	1900	0,484	20,675
60	0,354	28,260	2000	0,486	20,593
90	0,370	27,010	2100	0,485	20,598
120	0,382	26,188	2400	0,491	20,356
150	0,390	25,611	2500	0,490	20,402
180	0,398	25,141	2700	0,493	20,274
210	0,404	24,763	2800	0,495	20,206
240	0,409	24,420	3000	0,495	20,193
270	0,414	24,128	3300	0,498	20,076
300	0,418	23,923	3600	0,504	19,832
360	0,425	23,525	DESCARREGAMENTO		
420	0,431	23,200	3630	0,383	26,096
480	0,436	22,932	3660	0,373	26,781
540	0,440	22,714	3690	0,368	27,211
600	0,444	22,526	3720	0,364	27,480
660	0,447	22,358	3750	0,361	27,716
720	0,451	22,150	3780	0,358	27,902
780	0,453	22,062	3810	0,357	28,043
840	0,456	21,954	3840	0,355	28,169
900	0,459	21,794	3870	0,354	28,273
960	0,462	21,632	3900	0,352	28,385
990	0,462	21,662	3960	0,350	28,547
1000	0,462	21,634	4020	0,349	28,694
1100	0,465	21,500	4080	0,347	28,802
1200	0,470	21,282	4140	0,346	28,902
1300	0,471	21,216	4200	0,345	28,986
1400	0,474	21,115	4260	0,344	29,070
1500	0,478	20,939	4320	0,343	29,155
1600	0,478	20,920	4380	0,342	29,206
1700	0,481	20,797	4440	0,342	29,265
1800	0,481	20,809	4500	0,341	29,317
DADOS DO CORPO-DE-PROVA ENSAIADO					
Mar (g)	1252,39	Tensão normal (Kgf/cm <sup>2</sup> )		1,0	
Mimersa (g)	726,4				
d	2,381015	Def. T (%)		0,504	
D (mm)	101,83333	Def.vp (%)		0,341	
H (mm)	65,48667	Def. el (%)		0,163	
Pagreg (pcm)	95,0	MF (MPa)		19,832	
Pb (pcm)	5,0				
D	2,444961				
Vv (5)	2,615433				
RBV (%)	81,69371				

TABELA 25 – Resultado do ensaio de fluência realizado com o corpo-de-prova P12C.

ENSAIO DE FLUÊNCIA POR COMPRESSÃO UNIAXIAL ESTÁTICA					
Asfalto modificado			Corpo-de-prova: P12C		
Tempo (s)	Def. (%)	MF (MPa)	Tempo (s)	Def. (%)	MF (MPa)
30	0,353	28,314	1900	0,507	19,729
60	0,374	26,753	2000	0,508	19,694
90	0,391	25,561	2100	0,510	19,616
120	0,402	24,863	2400	0,514	19,460
150	0,411	24,308	2500	0,515	19,411
180	0,418	23,914	2700	0,517	19,340
210	0,424	23,590	2800	0,519	19,282
240	0,429	23,314	3000	0,520	19,214
270	0,434	23,040	3300	0,523	19,120
300	0,438	22,841	3600	0,526	19,017
360	0,444	22,516	DESCARREGAMENTO		
420	0,450	22,220	3630	0,373	26,824
480	0,455	21,956	3660	0,361	27,693
540	0,461	21,682	3690	0,354	28,217
600	0,465	21,528	3720	0,350	28,547
660	0,469	21,326	3750	0,347	28,810
720	0,472	21,195	3780	0,344	29,036
780	0,475	21,070	3810	0,342	29,223
840	0,478	20,941	3840	0,341	29,360
900	0,481	20,780	3870	0,339	29,490
960	0,482	20,745	3900	0,338	29,603
990	0,483	20,706	3960	0,336	29,797
1000	0,484	20,672	4020	0,334	29,967
1100	0,488	20,485	4080	0,332	30,111
1200	0,490	20,396	4140	0,331	30,248
1300	0,494	20,255	4200	0,330	30,340
1400	0,496	20,154	4260	0,328	30,469
1500	0,498	20,093	4320	0,327	30,553
1600	0,500	19,983	4380	0,326	30,647
1700	0,503	19,892	4440	0,326	30,722
1800	0,506	19,781	4500	0,325	30,798
DADOS DO CORPO-DE-PROVA ENSAIADO					
Mar (g)	1252,34	Tensão normal (Kgf/cm <sup>2</sup> )		1,0	
Mimersa (g)	721,7				
d	2,360056	Def. T (%)		0,526	
D (mm)	101,66667	Def. vp (%)		0,325	
H (mm)	65,73333	Def. el (%)		0,201	
Pagreg (pcm)	94,5	MF (MPa)		19,017	
Pb (pcm)	5,5				
D	2,427115				
Vv (5)	2,762928				
RBV (%)	82,16168				

TABELA 26 – Resultado do ensaio de fluência realizado com o corpo-de-prova P11C.

ENSAIO DE FLUÊNCIA POR COMPRESSÃO UNIAXIAL ESTÁTICA					
Asfalto modificado			Corpo-de-prova: P11C		
Tempo (s)	Def. (%)	MF (MPa)	Tempo (s)	Def. (%)	MF (MPa)
30	0,255	39,202	1900	0,359	27,866
60	0,268	37,354	2000	0,361	27,671
90	0,274	36,489	2100	0,362	27,597
120	0,281	35,608	2400	0,368	27,187
150	0,287	34,848	2500	0,369	27,097
180	0,291	34,316	2700	0,371	26,972
210	0,295	33,888	2800	0,372	26,885
240	0,298	33,613	3000	0,374	26,703
270	0,300	33,317	3300	0,377	26,539
300	0,303	32,997	3600	0,380	26,344
360	0,308	32,462	DESCARREGAMENTO		
420	0,312	32,100	3630	0,229	43,592
480	0,315	31,722	3660	0,216	46,275
540	0,319	31,359	3690	0,210	47,642
600	0,321	31,152	3720	0,205	48,876
660	0,324	30,866	3750	0,201	49,702
720	0,327	30,579	3780	0,199	50,378
780	0,330	30,315	3810	0,196	50,968
840	0,331	30,224	3840	0,195	51,414
900	0,334	29,931	3870	0,193	51,867
960	0,336	29,796	3900	0,192	52,219
990	0,337	29,660	3960	0,189	52,882
1000	0,337	29,642	4020	0,187	53,419
1100	0,341	29,318	4080	0,186	53,850
1200	0,343	29,129	4140	0,184	54,259
1300	0,346	28,883	4200	0,183	54,615
1400	0,349	28,667	4260	0,182	54,915
1500	0,351	28,490	4320	0,181	55,157
1600	0,353	28,297	4380	0,180	55,432
1700	0,356	28,123	4440	0,180	55,679
1800	0,357	28,008	4500	0,179	55,897
DADOS DO CORPO-DE-PROVA ENSAIADO					
Mar (g)	1245,63	Tensão normal (Kgf/cm <sup>2</sup> )		1,0	
Mimersa (g)	718,0				
d	2,360802	Def.T (%)		0,380	
D (mm)	101,68	Def.vp (%)		0,179	
H (mm)	65,96667	Def. el (%)		0,201	
Pagreg (pcm)	94,5	MF (MPa)		26,344	
Pb (pcm)	5,5				
D	2,427115				
Vv (5)	2,732179				
RBV (%)	82,32971				

TABELA 27 – Resultado do ensaio de fluência realizado com o corpo-de-prova P10C.

ENSAIO DE FLUÊNCIA POR COMPRESSÃO UNIAXIAL ESTÁTICA					
Asfalto modificado			Corpo-de-prova: P10C		
Tempo (s)	Def. (%)	MF (MPa)	Tempo (s)	Def. (%)	MF (MPa)
30	0,413	24,222	1900	0,651	15,370
60	0,449	22,291	2000	0,650	15,373
90	0,477	20,960	2100	0,654	15,300
120	0,490	20,388	2400	0,659	15,172
150	0,503	19,864	2500	0,662	15,105
180	0,515	19,430	2700	0,663	15,085
210	0,524	19,083	2800	0,666	15,008
240	0,533	18,777	3000	0,669	14,944
270	0,540	18,521	3300	0,671	14,897
300	0,547	18,265	3600	0,677	14,765
360	0,557	17,941	DESCARREGAMENTO		
420	0,566	17,664	3630	0,537	18,632
480	0,574	17,434	3660	0,526	19,008
540	0,581	17,214	3690	0,520	19,249
600	0,586	17,055	3720	0,516	19,395
660	0,592	16,897	3750	0,512	19,516
720	0,596	16,767	3780	0,510	19,612
780	0,601	16,646	3810	0,508	19,697
840	0,607	16,465	3840	0,506	19,767
900	0,612	16,352	3870	0,504	19,826
960	0,614	16,298	3900	0,503	19,885
990	0,617	16,208	3960	0,501	19,972
1000	0,618	16,193	4020	0,499	20,044
1100	0,623	16,053	4080	0,497	20,113
1200	0,627	15,943	4140	0,496	20,178
1300	0,632	15,823	4200	0,494	20,227
1400	0,634	15,766	4260	0,493	20,276
1500	0,637	15,697	4320	0,492	20,321
1600	0,639	15,646	4380	0,491	20,354
1700	0,644	15,519	4440	0,491	20,387
1800	0,646	15,482	4500	0,490	20,429
DADOS DO CORPO-DE-PROVA ENSAIADO					
Mar (g)	1250,84	Tensão normal (Kgf/cm <sup>2</sup> )		1,0	
Mimersa (g)	719,9				
d	2,355897	Def. T (%)		0,677	
D (mm)	101,7	Def. vp (%)		0,490	
H (mm)	65,94667	Def. el (%)		0,187	
Pagreg (pcm)	94,5	MF (MPa)		14,765	
Pb (pcm)	5,5				
D	2,427115				
Vv (5)	2,934271				
RBV (%)	81,23584				

TABELA 28 – Resultado do ensaio de fluência realizado com o corpo-de-prova P14C.

ENSAIO DE FLUÊNCIA POR COMPRESSÃO UNIAXIAL ESTÁTICA					
Asfalto modificado			Corpo-de-prova: P14C		
Tempo (s)	Def. (%)	MF (MPa)	Tempo (s)	Def. (%)	MF (MPa)
30	0,561	17,821	1900	0,977	10,238
60	0,639	15,650	2000	0,980	10,204
90	0,689	14,519	2100	0,989	10,109
120	0,710	14,078	2400	0,994	10,059
150	0,735	13,611	2500	1,001	9,990
180	0,754	13,269	2700	1,002	9,978
210	0,770	12,989	2800	1,010	9,905
240	0,785	12,742	3000	1,012	9,878
270	0,796	12,557	3300	1,018	9,826
300	0,807	12,397	3600	1,027	9,734
360	0,825	12,121	DESCARREGAMENTO		
420	0,841	11,892	3630	0,839	11,926
480	0,854	11,710	3660	0,822	12,167
540	0,864	11,569	3690	0,814	12,293
600	0,876	11,414	3720	0,808	12,384
660	0,885	11,302	3750	0,803	12,449
720	0,893	11,196	3780	0,800	12,503
780	0,900	11,105	3810	0,797	12,547
840	0,909	11,005	3840	0,795	12,582
900	0,915	10,933	3870	0,793	12,612
960	0,920	10,871	3900	0,791	12,639
990	0,921	10,852	3960	0,789	12,679
1000	0,922	10,846	4020	0,787	12,713
1100	0,931	10,740	4080	0,785	12,744
1200	0,938	10,656	4140	0,783	12,768
1300	0,949	10,542	4200	0,782	12,789
1400	0,954	10,484	4260	0,781	12,811
1500	0,958	10,441	4320	0,779	12,830
1600	0,964	10,373	4380	0,779	12,845
1700	0,971	10,301	4440	0,778	12,862
1800	0,975	10,254	4500	0,777	12,873
DADOS DO CORPO-DE-PROVA ENSAIADO					
Mar (g)	1250,42	Tensão normal (Kgf/cm <sup>2</sup> )		1,0	
Mimersa (g)	710,2				
d	2,31465	Def. T (%)		1,027	
D (mm)	101,92667	Def.vp (%)		0,777	
H (mm)	66,89333	Def. el (%)		0,250	
Pagreg (pcm)	94,0	MF (MPa)		9,734	
Pb (pcm)	6,0				
D	2,409528				
Vv (5)	3,937631				
RBV (%)	77,56747				

TABELA 29 – Resultado do ensaio de fluência realizado com o corpo-de-prova P13C.

ENSAIO DE FLUÊNCIA POR COMPRESSÃO UNIAXIAL ESTÁTICA					
Asfalto modificado			Corpo-de-prova: P13C		
Tempo (s)	Def. (%)	MF (MPa)	Tempo (s)	Def. (%)	MF (MPa)
30	0,505	19,815	1900	0,892	11,208
60	0,560	17,846	2000	0,898	11,139
90	0,596	16,785	2100	0,903	11,071
120	0,619	16,146	2400	0,913	10,947
150	0,640	15,623	2500	0,917	10,906
180	0,658	15,200	2700	0,923	10,836
210	0,673	14,862	2800	0,926	10,803
240	0,686	14,583	3000	0,934	10,710
270	0,698	14,329	3300	0,941	10,633
300	0,708	14,124	3600	0,956	10,456
360	0,727	13,762	DESCARREGAMENTO		
420	0,742	13,474	3630	0,756	13,229
480	0,756	13,222	3660	0,741	13,490
540	0,768	13,021	3690	0,732	13,654
600	0,779	12,829	3720	0,727	13,757
660	0,789	12,682	3750	0,723	13,839
720	0,797	12,539	3780	0,719	13,910
780	0,806	12,411	3810	0,716	13,961
840	0,814	12,279	3840	0,714	14,010
900	0,820	12,198	3870	0,712	14,045
960	0,826	12,106	3900	0,710	14,079
990	0,830	12,054	3960	0,708	14,132
1000	0,832	12,026	4020	0,705	14,184
1100	0,842	11,882	4080	0,703	14,225
1200	0,851	11,746	4140	0,701	14,261
1300	0,857	11,670	4200	0,700	14,292
1400	0,866	11,546	4260	0,698	14,325
1500	0,874	11,446	4320	0,697	14,353
1600	0,878	11,385	4380	0,695	14,380
1700	0,882	11,332	4440	0,694	14,403
1800	0,889	11,246	4500	0,693	14,424
DADOS DO CORPO-DE-PROVA ENSAIADO					
Mar (g)	1242,66	Tensão normal (Kgf/cm <sup>2</sup> )		1,0	
Mimersa (g)	709,80				
d	2,332057	Def. T (%)		0,956	
D (mm)	101,99333	Def.vp (%)		0,693	
H (mm)	66,59333	Def. el (%)		0,263	
Pagreg (pcm)	94,0	MF (MPa)		10,456	
Pb (pcm)	6,0				
D	2,409528				
Vv (5)	3,215182				
RBV (%)	81,01252				

TABELA 30 – Resultado do ensaio de fluência realizado com o corpo-de-prova P15B.

ENSAIO DE FLUÊNCIA POR COMPRESSÃO UNIAXIAL ESTÁTICA					
Asfalto modificado			Corpo-de-prova: P15B		
Tempo (s)	Def. (%)	MF (MPa)	Tempo (s)	Def. (%)	MF (MPa)
30	0,435	22,967	1900	0,783	12,764
60	0,474	21,082	2000	0,793	12,617
90	0,500	19,990	2100	0,798	12,533
120	0,520	19,242	2400	0,814	12,290
150	0,535	18,697	2500	0,815	12,277
180	0,550	18,191	2700	0,826	12,114
210	0,562	17,784	2800	0,829	12,060
240	0,573	17,456	3000	0,841	11,888
270	0,584	17,129	3300	0,851	11,754
300	0,592	16,886	3600	0,864	11,577
360	0,609	16,424	DESCARREGAMENTO		
420	0,623	16,048	3630	0,663	15,094
480	0,636	15,722	3660	0,644	15,518
540	0,648	15,435	3690	0,634	15,763
600	0,658	15,204	3720	0,628	15,934
660	0,667	14,983	3750	0,623	16,064
720	0,676	14,784	3780	0,618	16,171
780	0,686	14,583	3810	0,615	16,258
840	0,695	14,394	3840	0,612	16,335
900	0,702	14,248	3870	0,610	16,399
960	0,708	14,117	3900	0,608	16,450
990	0,713	14,033	3960	0,605	16,540
1000	0,713	14,019	4020	0,602	16,609
1100	0,725	13,795	4080	0,600	16,672
1200	0,732	13,660	4140	0,598	16,725
1300	0,742	13,484	4200	0,596	16,776
1400	0,751	13,311	4260	0,595	16,812
1500	0,760	13,150	4320	0,593	16,855
1600	0,767	13,040	4380	0,592	16,895
1700	0,774	12,919	4440	0,591	16,929
1800	0,779	12,831	4500	0,589	16,966
DADOS DO CORPO-DE-PROVA ENSAIADO					
Mar (g)	1236,79	Tensão normal (Kgf/cm <sup>2</sup> )		1,0	
Mimersa (g)	707,3				
d	2,335814	Def.T (%)		0,864	
D (mm)	102,12	Def.vp (%)		0,589	
H (mm)	66,86	Def. el (%)		0,275	
Pagreg (pcm)	94,0	MF (MPa)		11,577	
Pb (pcm)	6,0				
D	2,409528				
Vv (5)	3,05928				
RBV (%)	81,78931				



TABELA 31 – Resultados médios dos ensaios de fluência estática para o asfalto convencional, durante a fase de carregamento.

VALORES MÉDIOS DAS DEFORMAÇÕES AXIAIS (%)					
TEMPO	TEOR DE ASFALTO (%)				
(S)	4	4,5	5	5,5	6
30	0,130	0,139	0,254	0,394	0,450
60	0,137	0,145	0,270	0,425	0,488
90	0,139	0,149	0,280	0,443	0,512
120	0,141	0,151	0,287	0,455	0,533
150	0,143	0,154	0,293	0,467	0,549
180	0,145	0,156	0,298	0,476	0,562
210	0,147	0,158	0,302	0,483	0,573
240	0,148	0,159	0,306	0,490	0,584
270	0,149	0,161	0,309	0,496	0,592
300	0,150	0,162	0,312	0,501	0,599
360	0,152	0,164	0,316	0,511	0,613
420	0,153	0,166	0,321	0,519	0,625
480	0,154	0,168	0,325	0,526	0,636
540	0,156	0,170	0,329	0,533	0,645
600	0,157	0,172	0,332	0,538	0,653
660	0,158	0,173	0,335	0,543	0,660
720	0,159	0,174	0,338	0,548	0,668
780	0,159	0,176	0,340	0,552	0,674
840	0,160	0,177	0,342	0,556	0,680
900	0,161	0,178	0,344	0,560	0,685
960	0,161	0,179	0,347	0,563	0,691
990	0,162	0,179	0,348	0,565	0,694
1000	0,162	0,180	0,348	0,566	0,695
1100	0,163	0,181	0,351	0,571	0,702
1200	0,164	0,182	0,353	0,575	0,710
1300	0,164	0,184	0,357	0,579	0,716
1400	0,165	0,185	0,359	0,583	0,722
1500	0,166	0,186	0,360	0,587	0,727
1600	0,167	0,187	0,363	0,590	0,733
1700	0,167	0,188	0,365	0,592	0,737
1800	0,168	0,189	0,367	0,595	0,742
1900	0,168	0,189	0,368	0,599	0,746
2000	0,169	0,190	0,370	0,600	0,750
2100	0,169	0,191	0,371	0,604	0,753
2400	0,170	0,193	0,374	0,609	0,763
2500	0,171	0,194	0,376	0,611	0,767
2700	0,171	0,195	0,377	0,613	0,770
2800	0,172	0,195	0,377	0,614	0,774
3000	0,172	0,196	0,380	0,617	0,778
3300	0,173	0,197	0,382	0,621	0,784
3600	0,175	0,198	0,386	0,626	0,790
Def. T (%)	0,175	0,198	0,386	0,626	0,790

TABELA 32 – Resultados médios dos ensaios de fluência estática para o asfalto modificado, durante a fase de carregamento.

VALORES MÉDIOS DAS DEFORMAÇÕES AXIAIS (%)					
TEMPO	TEOR DE ASFALTO (%)				
(S)	4	4,5	5	5,5	6
30	0,180	0,201	0,323	0,340	0,500
60	0,190	0,212	0,348	0,363	0,558
90	0,195	0,218	0,363	0,381	0,595
120	0,199	0,224	0,373	0,391	0,616
150	0,203	0,229	0,382	0,401	0,637
180	0,206	0,232	0,388	0,408	0,654
210	0,209	0,235	0,394	0,414	0,668
240	0,212	0,238	0,399	0,420	0,681
270	0,214	0,241	0,403	0,425	0,693
300	0,216	0,243	0,407	0,429	0,702
360	0,219	0,247	0,414	0,437	0,720
420	0,221	0,251	0,419	0,443	0,735
480	0,225	0,254	0,424	0,448	0,749
540	0,227	0,257	0,428	0,454	0,760
600	0,229	0,259	0,432	0,457	0,771
660	0,231	0,261	0,434	0,462	0,780
720	0,233	0,263	0,438	0,465	0,789
780	0,234	0,265	0,440	0,468	0,797
840	0,236	0,267	0,443	0,472	0,806
900	0,237	0,268	0,446	0,476	0,812
960	0,238	0,270	0,448	0,477	0,818
990	0,239	0,270	0,449	0,479	0,821
1000	0,239	0,270	0,449	0,480	0,822
1100	0,241	0,272	0,452	0,484	0,833
1200	0,242	0,275	0,455	0,487	0,841
1300	0,244	0,276	0,457	0,491	0,849
1400	0,245	0,278	0,460	0,493	0,857
1500	0,246	0,280	0,463	0,495	0,864
1600	0,247	0,281	0,464	0,498	0,870
1700	0,248	0,282	0,466	0,501	0,876
1800	0,249	0,283	0,467	0,503	0,881
1900	0,250	0,285	0,469	0,505	0,884
2000	0,251	0,286	0,471	0,507	0,890
2100	0,252	0,287	0,471	0,509	0,897
2400	0,253	0,289	0,476	0,514	0,907
2500	0,254	0,290	0,477	0,515	0,911
2700	0,255	0,292	0,478	0,517	0,917
2800	0,255	0,292	0,479	0,519	0,921
3000	0,257	0,294	0,481	0,521	0,929
3300	0,258	0,296	0,483	0,524	0,936
3600	0,260	0,300	0,487	0,528	0,949
Def. T (%)	0,260	0,300	0,487	0,528	0,949

TABELA 33 – Resultados médios dos ensaios de fluência estática para o asfalto convencional, durante a fase de descarregamento.

VALORES MÉDIOS DAS DEFORMAÇÕES AXIAIS (%)					
TEMPO	TEOR DE ASFALTO (%)				
(S)	4	4,5	5	5,5	6
3630	0,070	0,094	0,239	0,456	0,552
3660	0,066	0,089	0,228	0,444	0,536
3690	0,065	0,087	0,223	0,438	0,528
3720	0,064	0,085	0,220	0,435	0,523
3750	0,063	0,084	0,218	0,432	0,519
3780	0,062	0,083	0,216	0,430	0,516
3810	0,062	0,083	0,215	0,428	0,514
3840	0,061	0,082	0,214	0,427	0,512
3870	0,061	0,082	0,213	0,426	0,511
3900	0,060	0,081	0,212	0,425	0,510
3960	0,060	0,081	0,210	0,423	0,507
4020	0,060	0,080	0,209	0,421	0,506
4080	0,059	0,080	0,208	0,420	0,504
4140	0,058	0,079	0,208	0,419	0,503
4200	0,058	0,079	0,207	0,418	0,502
4260	0,058	0,079	0,206	0,417	0,501
4320	0,058	0,078	0,206	0,416	0,500
4380	0,057	0,078	0,205	0,415	0,499
4440	0,057	0,078	0,205	0,414	0,498
4500	0,057	0,078	0,204	0,414	0,498
Def. <sub>vp</sub> (%)	0,057	0,078	0,204	0,414	0,498

TABELA 34 – Resultados médios dos ensaios de fluência estática para o asfalto modificado, durante a fase de descarregamento.

VALORES MÉDIOS DAS DEFORMAÇÕES AXIAIS (%)					
TEMPO (S)	TEOR DE ASFALTO (%)				
	4	4,5	5	5,5	6
3630	0,157	0,192	0,361	0,380	0,752
3660	0,150	0,185	0,350	0,368	0,736
3690	0,146	0,181	0,344	0,361	0,727
3720	0,144	0,179	0,341	0,357	0,721
3750	0,141	0,177	0,337	0,354	0,716
3780	0,140	0,175	0,335	0,351	0,712
3810	0,139	0,174	0,333	0,349	0,709
3840	0,138	0,173	0,331	0,347	0,707
3870	0,137	0,172	0,330	0,345	0,705
3900	0,136	0,171	0,329	0,344	0,703
3960	0,134	0,170	0,327	0,342	0,700
4020	0,133	0,169	0,325	0,340	0,698
4080	0,132	0,168	0,323	0,338	0,696
4140	0,131	0,167	0,322	0,337	0,694
4200	0,130	0,166	0,321	0,336	0,693
4260	0,130	0,165	0,320	0,335	0,691
4320	0,129	0,164	0,319	0,334	0,690
4380	0,128	0,164	0,318	0,333	0,689
4440	0,128	0,163	0,317	0,332	0,688
4500	0,127	0,163	0,316	0,331	0,687
Def. <sub>vp</sub> (%)	0,127	0,163	0,316	0,331	0,687

## **ANEXO V**

**RESULTADOS DOS ENSAIOS PARA DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA À  
TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL**

TABELA 01 – Resultados dos ensaios para determinação da resistência à tração por compressão diametral para corpos-de-prova moldados com asfalto convencional.

CP	TEOR	d	Vv (%)	RBV(%)	h (cm)	φ (cm)	carga(Kgf)	δ <sub>t</sub> (Kgf/cm <sup>2</sup> )
2C	4	2,334	6,044	59,991	6,670	10,184	20,500	8,742
MÉDIA	4	2,334	6,044	59,991	6,670	10,184	20,500	8,742
4C	4,5	2,347	4,806	68,091	6,645	10,187	21,600	9,242
5C	4,5	2,360	4,271	70,716	6,614	10,181	24,400	10,496
MÉDIA	4,5	2,354	4,538	69,403	6,630	10,184	23,000	9,869
8B	5	2,352	3,895	74,567	6,625	10,186	24,700	10,602
7C	5	2,366	3,361	77,357	6,623	10,181	23,000	9,880
8C	5	2,371	3,142	78,557	6,630	10,179	20,900	8,971
MÉDIA	5	2,363	3,466	76,827	6,626	10,182	22,867	9,818
12B	5,5	2,362	2,791	81,881	6,489	10,160	21,800	9,579
10C	5,5	2,351	3,270	79,336	6,735	10,160	17,400	7,365
12C	5,5	2,365	2,694	82,416	6,659	10,174	22,000	9,407
MÉDIA	5,5	2,359	2,918	81,211	6,628	10,165	20,400	8,783
13	6	2,336	3,169	81,112	6,757	10,239	14,200	5,945
13A	6	2,347	2,727	83,371	6,615	10,157	15,500	6,682
15A	6	2,355	2,385	85,189	6,673	10,145	18,300	7,831
MÉDIA	6	2,346	2,761	83,224	6,682	10,180	16,000	6,819

TABELA 02 – Resultados dos ensaios para determinação da resistência à tração por compressão diametral para corpos-de-prova moldados com asfalto modificado.

CP	TEOR	d	Vv (%)	RBV (%)	h (cm)	φ (cm)	carga(Kgf)	δ <sub>t</sub> (Kgf/cm <sup>2</sup> )
P1	4	2,316	6,663	57,684	6,594	10,218	19,200	8,254
P1A	4	2,329	6,151	59,753	6,620	10,165	22,000	9,470
P2C	4	2,363	4,755	66,091	6,487	10,155	22,200	9,761
MÉDIA	4	2,336	5,856	61,176	6,567	10,179	21,133	9,162
PD	4,5	2,365	3,981	72,382	6,593	10,168	20,000	8,642
P5	4,5	2,372	3,692	73,920	6,467	10,155	25,600	11,291
P5C	4,5	2,378	3,473	75,125	6,497	10,147	24,200	10,633
MÉDIA	4,5	2,372	3,716	73,809	6,519	10,156	23,267	10,189
PH	5	2,382	2,564	81,995	6,465	10,155	15,600	6,883
PI	5	2,367	3,200	78,379	6,633	10,166	20,400	8,763
P9C	5	2,387	2,391	83,033	6,497	10,157	25,700	11,280
MÉDIA	5	2,378	2,718	81,136	6,532	10,159	20,567	8,975
PJ	5,5	2,359	2,827	81,814	6,618	10,205	16,800	7,206
P12	5,5	2,355	2,976	81,013	6,686	10,159	20,300	8,657
P10A	5,5	2,360	2,766	82,143	6,683	10,164	17,100	7,292
MÉDIA	5,5	2,358	2,856	81,656	6,662	10,176	18,067	7,718
PN	6	2,323	3,573	79,277	6,827	10,175	13,600	5,672
P15C	6	2,325	3,499	79,630	6,848	10,211	16,000	6,628
MÉDIA	6	2,324	3,536	79,453	6,837	10,193	14,800	6,150

## **ANEXO VI**

**RESULTADOS DOS ENSAIOS DE MÓDULO DE RESILIÊNCIA POR  
COMPRESSÃO DIAMETRAL**



TABELA 01 – Resultados dos ensaios de módulo de resiliência por compressão diametral para corpos-de-prova moldados com asfalto convencional.

CP	TEOR	d	Vv (%)	RBV (%)	MR (MPa)
O2	4	2,35164	5,320825	63,18637	2210,53
1A	4	2,343991	5,628793	61,79121	2590,61
2B	4	2,355168	5,178801	63,84802	2437,57
MÉDIA	4	2,350266	5,37614	62,94187	2412,90
O4	4,5	2,371136	3,834116	72,98672	2701,97
4A	4,5	2,374515	3,697075	73,72589	2373,90
6B	4,5	2,377758	3,565545	74,44752	2756,97
MÉDIA	4,5	2,37447	3,698912	73,72004	2610,94
O1	5	2,373703	3,027446	79,19321	1606,94
O9	5	2,371942	3,099404	78,79109	1803,07
7A	5	2,378526	2,830422	80,31239	2062,40
MÉDIA	5	2,374724	2,985757	79,43223	1824,13
10A	5,5	2,360098	2,884722	81,37349	1609,27
10B	5,5	2,356279	3,041883	80,53065	1855,52
11B	5,5	2,362095	2,802577	81,81999	1186,65
MÉDIA	5,5	2,359491	2,909727	81,24138	1550,48
15	6	2,330435	3,4156	79,89753	*
14B	6	2,33731	3,130673	81,30503	*
15C	6	2,328313	3,503552	79,47122	*
MÉDIA	6	2,332019	3,349942	80,22459	*

TABELA 02 – Resultados dos ensaios de módulo de resiliência por compressão diametral para corpos-de-prova moldados com asfalto modificado.

CP	TEOR	d	Vv (%)	RBV (%)	MR (MPa)
PA	4	2,370436	4,473848	67,50941	1603,50
P2A	4	2,350168	5,2906	63,53058	1781,12
P3C	4	2,348825	5,344747	63,28104	1859,38
MÉDIA	4	2,356476	5,036398	64,77368	1748,00
PF	4,5	2,381429	3,314658	76,01717	1050,66
P5A	4,5	2,363567	4,039863	72,07602	1794,95
P4B	4,5	2,362144	4,097632	71,77717	1588,71
MÉDIA	4,5	2,369047	3,817384	73,29012	1478,10
PG	5	2,375036	2,85998	80,27914	1173,15
P8	5	2,373508	2,922459	79,92445	1489,54
P7B	5	2,382226	2,565894	81,98547	1670,71
MÉDIA	5	2,376923	2,782778	80,72969	1444,46
PK	5,5	2,374075	2,185329	85,41823	968,40
PL	5,5	2,352999	3,053664	80,60107	1118,32
P10	5,5	2,371662	2,284731	84,84233	1497,66
MÉDIA	5,5	2,366245	2,507908	83,62054	1194,79
P13A	6	2,338027	2,96743	82,25278	*
P14A	6	2,342571	2,778846	83,21819	*
P13B	6	2,326702	3,437446	79,92607	*
MÉDIA	6	2,335767	3,061241	81,79901	*

\* Os ensaios não puderam ser realizados face as condições de contorno dos corpos-de-prova estarem fora dos padrões normalizados.