ANDRESSA KA YAN NG

**Contribuição ao estudo da deformação
permanente de misturas asfálticas densas à luz
de ensaios de fluência por compressão uniaxial
estática e dinâmica**

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 Ciências, Programa de Pós Graduação em Engenharia de Transportes.

Área de Concentração: Infraestrutura de Transportes.

ORIENTADORA: Prof^a. Dr^a. Ana Paula Furlan

VERSÃO CORRIGIDA

**São Carlos
2013**

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTA TRABALHO,
POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS
DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

NG, Andressa Ka Yan
N576c Contribuição ao estudo da deformação permanente de
misturas asfálticas densas à luz de ensaios de fluência
por compressão uniaxial estática e dinâmica / Andressa
Ka Yan NG; orientadora Ana Paula Furlan. São Carlos,
2013.

Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação
em Engenharia de Transportes e Área de Concentração em
Infra-Estrutura de Transporte -- Escola de Engenharia
de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2013.

1. Deformação Permanente. 2. Creep Estático e
Dinâmico. 3. Misturas Asfálticas Densas. 4. Polímero
SBS . 5. Cal Hidratada. I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidata: Engenheira **ANDRESSA KA YAN NG.**

Título da dissertação: "Contribuição ao estudo da deformação permanente de misturas asfálticas densas à luz de ensaios de fluência por compressão uniaxial estática e dinâmica".

Data da defesa: 17/01/2013

Comissão Julgadora:**Resultado:**

Prof.^a Dr.^a **Ana Paula Furlan (Orientadora)**
(Escola de Engenharia de São Carlos/EEESC)

Aprovada

Prof. Dr. **Glauco Tulio Pessa Fabbri**
(Escola de Engenharia de São Carlos/EEESC)

Aprovada

Prof.^a Dr.^a **Lilian Tais de Gouveia**
(Universidade Estadual de Ponta Grossa/UEPG)

Aprovada

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes.
Prof. Associado **Antônio Nelson Rodrigues da Silva**

Presidente da Comissão de Pós-Graduação:
Prof. Titular **Denis Vinícius Coury**

42162/13
Programa de Pós-Graduação
Engenharia de Transportes
Protocolo nº 42162/13
Data 17/01/2013

Dedico a minha família: NG Chi Wai, Jussara NG e Marcelo Ka Hou NG, vocês são as pessoas mais importante da minha vida.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, por ter me dado força, paciência e perseverança nos momentos mais difíceis dessa jornada.

À minha família, NG Chi Wai, Jussara NG e Marcelo Ka Hou NG, por sempre estarem presente na minha vida, mesmo distantes. Por entenderem que à três anos atrás o melhor a se fazer era dar continuidade aos meus estudos para o meu amadurecimento profissional e pessoal, por apoiarem essa decisão mesmo sendo tão dolorosa, pois seria a primeira vez que um de nós nos distanciáramos. Sem o apoio de vocês nada disso seria possível.

À minha orientadora Prof. Dra. Ana Paula Furlan, por todo o apoio que recebi no desenvolvimento desse projeto, por estar sempre presente em todas as etapas da pesquisa, e aos seus ensinamentos. E por fim, mas não menos importante, à sua amizade, pois em muitos momentos foi compreensiva, paciente e amiga.

As minhas amigas Talita Caetano e Lígia Gesteira, pela nossa amizade verdadeira, fazendo com que os primeiros anos em São Carlos fossem os mais divertidos, e que mesmo distantes temos o apoio uma da outra.

Aos meus colegas e amigos do STT, em especial à Joicy Poloni, Cassiano Augusto Isler, Monique Martins Gomes, Marcela Navarro, Gustavo Henrique Santana Dantas e Fernando Hirose, por sempre estarem ao meu lado nos momentos de alegria e de dificuldade que passei durante essa jornada.

Aos técnicos do Laboratório de Estradas do Departamento de Transportes da EESC-USP, Antonio Carlos Gigante, Paulo Toyama e João D. Pereira Filho, pela recepção, pelo apoio nos trabalhos realizados no laboratório e pela amizade.

Aos docentes do STT, em especial ao professor Dr. Glauco Tulio Pessa Fabbri pelas colaborações na qualificação e ao apoio para a realização dos ensaios de *creep*.

Aos funcionários do STT, Toco, Paulinho, Magali, Beti, Alexandre e Heloísa.

À Usina Paulista de Britagem Pedreira São Jerônimo LTDA de Valinhos – SP, pelo fornecimento do agregado, e à Betunel pelo fornecimento do ligante asfáltico, em especial ao Sr. Romulo Constantino pela atenção.

E à CAPES pela bolsa de estudo concedida para a realização desta pesquisa.

"Mesmo a mulher mais sincera esconde algum segredo no fundo do seu coração."
(Immanuel Kant).

RESUMO

NG, A. K. Y. **Contribuição ao estudo de deformação permanente em misturas asfálticas densas à luz de ensaios de fluência por compressão uniaxial estática e dinâmica.** 2013.148p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2013.

Esta dissertação apresenta um estudo da deformação permanente de misturas asfálticas à luz dos resultados de ensaios de fluência por compressão uniaxial estática e dinâmica. Para isso, um programa experimental completo foi desenvolvido combinando fatores relacionados às misturas asfálticas e às condições de ensaio. Foram produzidos corpos de prova de misturas asfálticas densas tipo CAUQ com asfalto convencional (CAP 50/70) e com asfalto modificado com polímero SBS (CAP 50/70+SBS), variando o volume de vazios em dois níveis, 4 e 7%, e a presença de aditivo em dois níveis, sem e com cal hidratada. Os corpos de prova foram submetidos a ensaios de fluência com carregamentos estático e dinâmico em dois níveis de tensões, 0,1MPa e 0,4MPa, e em duas temperaturas diferentes, 40 e 50° C. Essas condições do programa experimental permitiram observar o efeito do modificador SBS, da presença da cal e do volume de vazios nas misturas asfálticas, e entender o efeito da temperatura, do nível de tensão e do tipo de carregamento no comportamento de cada tipo de mistura asfáltica. Os resultados indicam que (i) a adição da cal promoveu redução de deformação acumulada somente nas misturas com ligante convencional (CAP 50/70); (ii) as misturas com volume de vazios de 7% apresentam maiores acúmulos de deformação permanente independente da presença de cal, do tipo de carregamento e da temperatura do ensaio, sendo maiores para a mistura asfáltica com CAP 50/70; (iii) as misturas com ligante modificado se mostraram menos sensíveis às variações da temperatura e do nível de tensão; (iv) e a melhora das características das misturas com asfalto modificado com polímero é detectada somente a partir de ensaios dinâmicos.

PALAVRAS-CHAVE: Deformação Permanente, *Creep* Estático e Dinâmico, Mistura Asfálticas Densas, Polímero SBS e Cal Hidratada.

ABSTRACT

NG, A. K. Y. **Contribution for the rutting study on hot mixture asphalt by means of static and dynamic creep tests**. 2013.148p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2013.

This paper presents a study of rutting on hot mixture asphalt (HMA) by means of static and dynamic creep tests. A full factorial experiment was developed considering factors related to HMA and to the test conditions. It was produced HMA (unmodified (CAP 50/70) and SBS modified binders) specimens at two different air voids (4 and 7%) and with or without hydrated lime. The specimens were submitted to static and dynamic creep tests at two stress levels, 0,1MPa e 0,4MPa, and two temperatures, 40 e 50° C. These conditions of the experimental program allowed to observe the effects of the modifier SBS, the presence of the lime and the air voids in HMA, and to understand the effects of the temperature, stress and the type of loading on the behavior of each type of asphalt mix. The results indicate that (i) the addition of lime promoted reduction of accumulative deformation only in mixtures with conventional binder (CAP 50/70), (ii) mixtures with 7% air voids showed greater accumulation of permanent deformation regardless of presence of lime, the type of load and temperature of the test, mainly for the conventional HMA, (iii) the Polymer Modified Asphalt – Hot Mix Asphalt (PMA-HMA) were less sensitive to temperature and the stress variation (iv) the improvement of the polymer modified asphalt mixture characteristics (PMA-HMA) were detected only on dynamic load conditions.

KEY WORDS: Rutting, Static and Dynamic Creep Test, Hot Mixture Asphalt, Polymer Modified and Hydrated Lime.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1. Representação dos estágios de deformação por fluência do ensaio de <i>creep</i> estático (Little <i>et al.</i> , 1993).....	45
Figura 2.2. Influência da intensidade de tensão na velocidade de deformação de fluência (Little <i>et al.</i> , 1993).....	46
Figura 3.1. Faixa Granulométrica “C” – DNIT ES 031/2004	55
Figura 3.2. Resultados de ensaios de viscosidade em diferentes temperaturas.....	57
Figura 3.3. TUC do CAP 50/70.....	58
Figura 3.4. TUC do CAP 50/70+SBS	58
Figura 3.5. Tela do ensaio de <i>creep</i> estático.....	66
Figura 3.6. Tela do ensaio de <i>creep</i> dinâmico	67
Figura 4.1. Módulo de Resiliência das misturas asfálticas testadas	72
Figura 4.2. Recuperação Retardada	73
Figura 4.3. MR e RR <i>versus</i> Temperatura.....	73
Figura 4.4. Resistência a Tração por Compressão Diametral.....	76
Figura 4.5. Deformação x Carga– Virgem/40° C/50° C	79
Figura 4.6. Deformação Total (%) – <i>Creep</i> Estático à 0,1 MPa.....	83
Figura 4.7. Deformação Total (%) – <i>Creep</i> Estático à 0,4 MPa.....	83
Figura 4.8. Módulo de Fluência após Recuperação (kgf/cm ²) de 0,1 MPa à 40° C – <i>Creep</i> Estático	84
Figura 4.9. Módulo de Fluência após Recuperação (kgf/cm ²) de 0,1 MPa à 50° C – <i>Creep</i> Estático	85
Figura 4.10. Módulo de Fluência após Recuperação (MPa) – <i>Creep</i> Estático à 0,4 MPa	85
Figura 4.11. I_{curva} – <i>Creep</i> Estático à 0,1 MPa e 0,4 MPa.....	86
Figura 4.12. Curva de Deformação(mm/mm) x Tempo(s) – <i>Creep</i> Estático à 0,1 MPa.....	87
Figura 4.13. Curva de Deformação (mm/mm) x Tempo (s) – <i>Creep</i> Estático à 0,4 MPa.....	88
Figura 4.14. D_t (Variável “adição da cal”) – <i>Creep</i> Estático à 0,1 MPa	90
Figura 4.15. D_t (Variável “adição da cal”) – <i>Creep</i> Estático à 0,4 MPa	90
Figura 4.16. I_{curva} (Variável “adição da cal”) – <i>Creep</i> Estático à 0,1 MPa.....	93
Figura 4.17. D_t (Variável “volume de vazios”) – <i>Creep</i> Estático 0,1 e 0,4 MPa.....	96

Figura 4.18. M_f (Variável “ <i>volume de vazios</i> ”) – Creep Estático 0,1 e 0,4 MPa	97
Figura 4.19. I_{curva} (Variável “ <i>volume de vazios</i> ”) – Creep Estático 0,1 e 0,4 MPa.....	98
Figura 4.20. D_t (Variável “ <i>temperatura</i> ”) – Creep Estático 0,1 MPa	101
Figura 4.21. D_t (Variável “ <i>temperatura</i> ”) – Creep Estático 0,4 MPa	101
Figura 4.22. M_f (Variável “ <i>temperatura</i> ”) – Creep Estático 0,1 MPa	102
Figura 4.23. M_f (Variável “ <i>temperatura</i> ”) – Creep Estático 0,4 MPa	103
Figura 4.24. I_{curva} (Variável “ <i>temperatura</i> ”) – Creep Estático 0,1 MPa.....	104
Figura 4.25. I_{curva} (Variável “ <i>temperatura</i> ”) – Creep Estático 0,4 MPa.....	105
Figura 4.26. D_t para creep estático à 40 e 50° C – Variação do <i>Nível de Tensão</i>	107
Figura 4.27. M_f para creep estático à 40 e 50° C – Variação do <i>Nível de Tensão</i>	108
Figura 4.28. I_{curva} para creep estático à 40 e 50° C – Variação do <i>Nível de Tensão</i>	109
Figura 4.29. <i>Recuperação</i> para creep estático à 40 e 50° C – Variação do <i>Nível de Tensão</i>	110
Figura 4.30. <i>Deformação total</i> (%) - Creep Dinâmico à 0,1 MPa.....	112
Figura 4.31. <i>Deformação total</i> (%) - Creep Dinâmico à 0,4 MPa.....	113
Figura 4.32. <i>Módulo de Fluência</i> - Creep Dinâmico à 0,1 e 0,4 MPa.....	114
Figura 4.33. <i>Deformação Total x Módulo de Fluência</i> - Creep Dinâmico à 0,1 MPa.....	115
Figura 4.34. <i>Deformação Total x Módulo de Fluência</i> - Creep Dinâmico à 0,4 MPa.....	115
Figura 4.35. I_{curva} - Creep Dinâmico à 0,1 MPa.....	116
Figura 4.36. I_{curva} - Creep Dinâmico à 0,4 MPa.....	117
Figura 4.37. D_t para as misturas com asfalto convencional (Variável “ <i>adição da cal</i> ”) – Creep Dinâmico 0,1 e 0,4 MPa.....	117
Figura 4.38. D_t para as misturas com asfalto modificado (Variável “ <i>adição da cal</i> ”) – Creep Dinâmico 0,1 e 0,4 MPa.....	118
Figura 4.39. M_f (Variável “ <i>adição da cal</i> ”) – Creep Dinâmico 0,1 e 0,4 MPa	119
Figura 4.40. I_{curva} (Variável “ <i>adição da cal</i> ”) – Creep Dinâmico 0,1 e 0,4 MPa.....	120
Figura 4.41. M_f (Variável “ <i>volume de vazios</i> ”) – Creep Dinâmico 0,1 e 0,4 MPa	122
Figura 4.42. D_t (Variável “ <i>temperatura</i> ”) – Creep Dinâmico 0,1 MPa	125
Figura 4.43. D_t (Variável “ <i>temperatura</i> ”) – Creep Dinâmico 0,4 MPa	125
Figura 4.44. D_t (Variável “ <i>tensão</i> ”) – Creep Dinâmico 0,1 e 0,4 MPa.....	128
Figura 4.45. $D_t \times M_f \times Temperatura$ – Creep Dinâmico 0,1 MPa	129
Figura 4.46. $D_t \times M_f \times Temperatura$ – Creep Dinâmico 0,4 MPa	130
Figura 4.47. I_{curva} (Variável “ <i>tensão</i> ”) – Creep Dinâmico 0,1 e 0,4 MPa	131

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1. Critérios de avaliação do módulo de fluência estabelecido para o ensaio de fluência por compressão uniaxial estática (Fonte: Santanna-Greco, 2004).....	48
Tabela 2.2. Valores limites para a deformação após 1 hora de ensaio de <i>creep</i> e para inclinação da curva de fluência no estágio secundário (Fonte: Little <i>et al.</i> , 1993).	49
Tabela 2.3. Critérios relacionado ao módulo de fluência após 1 hora de carregamento (Fonte: Little <i>et al.</i> , 1993).	50
Tabela 3.1. Porcentagem e quantidade de material de cada fração de agregado para enquadramento centro da Faixa “C” do DNIT.	55
Tabela 3.2. Resultados dos ensaios de caracterização do agregado	56
Tabela 3.3. Parâmetros para o Ensaio de Brookfield	56
Tabela 3.4 Temperaturas de aquecimento e de compactação para as misturas asfálticas	59
Tabela 3.5. Teores estimados para ligante asfáltico	60
Tabela 4.1. Valores de MR e RR das misturas asfálticas	71
Tabela 4.2. Resultados dos ensaios de RT para as misturas com $V_v=4\%$	75
Tabela 4.3. Resultados dos ensaios de RT para as misturas com $V_v=7\%$	75
Tabela 4.4. Valores médios para os parâmetros $D_f/M_f/I_{curva}/Recuperação - Creep$ Estático 0,1 MPa.....	81
Tabela 4.5. Valores médios para os parâmetros $D_f/M_f/I_{curva}/Recuperação - Creep$ Estático 0,4 MPa.....	81
Tabela 4.6. Valores médios e taxas para <i>Deformação Total</i> – Efeito da <i>adição da cal</i>	90
Tabela 4.7. Valores médios e taxas de variação para <i>Módulo de Fluência</i> – Efeito da <i>adição da cal</i>	91
Tabela 4.8. Valores médios e taxas de variação para I_{curva} – Efeito da <i>adição da cal</i>	93
Tabela 4.9. Valores médios e taxas de variação para <i>Recuperação</i> – Efeito da <i>adição da cal</i>	94
Tabela 4.10. Valores médios e taxas de variação para <i>Deformação Total</i> – Efeito da Variação do V_v	95
Tabela 4.11. Valores médios e taxas de variação para <i>Módulo de Fluência</i> – Efeito da Variação do V_v	96
Tabela 4.12. Valores médios e taxas de variação para I_{curva} – Efeito da Variação do V_v	98
Tabela 4.13. Valores médios e taxas de variação para <i>Recuperação</i> – Efeito da Variação do V_v	99
Tabela 4.14. Valores médios e taxas de variação para <i>Deformação Total</i> – Efeito da Variação da <i>Temperatura</i>	100

Tabela 4.15. Valores médios e taxas de variação para <i>Módulo de Fluência</i> – Efeito da Variação da <i>Temperatura</i>	102
Tabela 4.16. Valores médios e taxas de variação para I_{curva} – Efeito da Variação da <i>Temperatura</i>	104
Tabela 4.17. Valores médios e taxas de variação para <i>Recuperação</i> – Efeito da Variação da <i>Temperatura</i>	106
Tabela 4.18. Valores médios para os parâmetros $D_t/M_f/I_{curva}$ – <i>Creep</i> Dinâmico 0,1 MPa	111
Tabela 4.19. Valores médios para os parâmetros $D_t/M_f/I_{curva}$ – <i>Creep</i> Dinâmico 0,4 MPa	111
Tabela 4.20. Valores médios e taxas para <i>Deformação Total</i> – Efeito da <i>variação do volume de vazios</i> – <i>Creep</i> Dinâmico	121
Tabela 4.21. Valores médios e taxas para <i>Módulo de Fluência</i> – Efeito da <i>variação do volume de vazios</i> – <i>Creep</i> Dinâmico	122
Tabela 4.22. Valores médios e taxas para I_{curva} – Efeito da <i>adição da cal</i> – <i>Creep</i> Dinâmico 123	
Tabela 4.23. Valores médios e taxas para <i>Deformação Total</i> – Efeito da variação de <i>temperatura</i> – <i>Creep</i> Dinâmico	124
Tabela 4.24. Valores médios e taxas para <i>Módulo de Fluência</i> – Efeito da variação de <i>temperatura</i> – <i>Creep</i> Dinâmico	126
Tabela 4.25. Valores médios e taxas para I_{curva} – Efeito da variação de <i>temperatura</i> – <i>Creep</i> Dinâmico.....	127
Tabela A.1. Propriedades volumétricas das misturas asfálticas com $V_v=4\%$	147
Tabela A.2. Propriedades volumétricas das misturas asfálticas com $V_v=7\%$	148

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AASHTO	American Association of States Highway and Transportation Officials
ASTM	American Society for Testing and Materials
BPM	borracha de pneu moída
CAP	cimento asfáltico de petróleo
CBUQ	concreto asfáltico usinado à quente
CGS	compactador giratório SUPERPAVE®
cm	centímetro
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
D_t	deformação total (%)
ESALs	solicitações equivalente do eixo padrão
FI	faixa inferior
FS	faixa superior
Gmb	densidade aparente
Gmm	densidade máxima teórica
I_{curva}	inclinação da curva

Kgf	quilograma-força
LVDT	linear variable differential transducers
M _f	módulo de fluência (MPa)
MPa	megapascal
MR	módulo de resiliência
MR	módulo de resiliência
MR _I	módulo instantâneo
MR _T	módulo total
N	número de aplicações de carga
NCHRP	National Cooperative Highway Research Program
°C	graus celsius
PG	<i>performance grade</i> - grau de desempenho
RBV	relação betume-vazios
RR	recuperação retardada
RT	resistência à tração
SBS	estireno-butadieno-estireno
SUPERPAVE®	Superior Performing Asphalt Pavements
TMN	tamanho máximo nominal
TUC	temperatura de usinagem e compactação

VAM vazios do agregado mineral

Vv volume de vazios

LISTA DE SÍMBOLOS

μ	coeficiente de Poisson
A_n	abrasão “Los Angeles” da graduação n
C_m	fator de correção Shell para efeito dinâmico
S_{asf}	rigidez do asfalto
$S_{asf,visc}$	componente viscosa ou não recuperável da rigidez do asfalto
S_{mix}	rigidez da mistura
$S_{mix,visc}$	componente viscosa ou não recuperável da rigidez da mistura
Z	fator de distribuição da tensão de compressão
Δ	deslocamento total
ϵ_I	deformação total
ϵ_p	deformação permanente
ϵ_{qu}	deformação determinada pelo ensaio de compressão não confinada
ϵ_{rt}	deformação elástica total
ϵ_T	deformação elástica instantânea.
η	viscosidade do asfalto
σ	tensão aplicada

σ_{contato} pressão de contato dos pneus

σ_R resistência à tração

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	vii
RESUMO	xi
ABSTRACT	xii
LISTA DE FIGURAS	xv
LISTA DE TABELAS	xvii
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	xix
LISTA DE SÍMBOLOS	xxiii
1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS	29
1.1. Introdução	29
1.2. Objetivos.....	30
1.3. Organização do trabalho.....	31
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	33
2.1. Deformação Permanente	33
2.2. Fatores Influentes no Desenvolvimento da Deformação Permanente.....	35
2.2.1. Ligante Asfáltico	35
2.2.2. Agregados	37
2.2.3. Mistura Asfáltica	41
2.3. Ensaio de <i>Creep</i>	42
2.3.1. Introdução	42
2.3.2. Ensaio de <i>Creep</i> Estático.....	44
2.3.2.1. Efeito da tensão no ensaio de creep estático.....	45
2.3.3. Métodos e Critérios para Avaliação da Mistura Asfáltica.....	47
2.3.4. Condições para o Ensaio de <i>Creep</i> Estático	51
2.3.5. Ensaio de <i>Creep</i> Dinâmico	52
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	53
3.1. Considerações Iniciais	53
3.2. Materiais	54
3.2.1. Agregado	54

3.2.2. Ligante Asfáltico.....	56
3.2.3. Misturas Asfálticas.....	59
3.2.3.1. Dosagem.....	59
3.2.3.2. Moldagem	61
3.3. Ensaio de Propriedades Mecânicas	61
3.3.1. Módulo de Resiliência	62
3.3.2. Fluência por Compressão Uniaxial Estática (<i>Creep</i> Estático)	64
3.3.3. Fluência por Compressão Uniaxial Dinâmica (<i>Creep</i> Dinâmico)	67
3.3.4. Resistência à Tração por Compressão Diametral	68
3.4. Análise dos Resultados	69
4. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	71
4.1. Módulo de Resiliência	71
4.2. Resistência à Tração por Compressão Diametral	75
4.3. <i>Creep</i> Estático	81
4.3.1. Tipo de asfalto.....	82
4.3.2. Adição da cal.....	88
4.3.3. Variação do volume de vazios	94
4.3.4. Variação da temperatura	99
4.3.5. Variação do nível de tensão	106
4.4. <i>Creep</i> Dinâmico	111
4.4.1. Tipo de asfalto.....	112
4.4.2. Adição da cal.....	117
4.4.3. Variação do volume de vazios	120
4.4.4. Variação da temperatura	123
4.4.5. Variação do nível de tensão	127
5. CONCLUSÕES	133
5.1. Sobre o Efeito do Tipo de Asfalto	134
5.2. Sobre o Efeito do Volume de Vazios.....	134
5.3. Sobre o Efeito da Adição de Cal	135
5.4. Sobre o Efeito da Mudança das Características de Ensaio	135

5.5. Sobre a Rigidez, a Resistência e a Deterioração das Misturas Submetidas a Ensaios Prévios	136
6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	139
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	141
ANEXO.....	147

CAPÍTULO

1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

1.1. INTRODUÇÃO

No Brasil, a maioria das rodovias pavimentadas possui revestimento asfáltico. Com o aquecimento na economia do país, a preferência pelo modal rodoviário no escoamento de certos tipos de produtos e o aumento da frota, as rodovias vêm sendo submetidas a um volume maior de veículos, a um aumento das cargas transportadas e ao aumento de pressão de inflação de pneus, causando-lhes danos precoces.

O dano dos revestimentos asfálticos está relacionado a três principais mecanismos de deterioração, a deformação permanente, as trincas por fadiga e as trincas térmicas. Para que a ocorrência desses tipos de defeitos seja reduzida, é necessário que os projetos de infraestrutura sejam dimensionados considerando as condições de carregamento de serviço, e a utilização de materiais de qualidade superiores.

Como o Brasil é um país de clima tropical, onde as temperaturas de serviço são elevadas na maior parte do ano, os revestimentos asfálticos se apresentam mais suscetíveis às deformações permanentes, defeito esse caracterizado por uma distorção, que ocorre na camada de revestimento em consequência da consolidação de uma ou mais camadas do pavimento (YODER E WITCZAK, 1975), ou mesmo por movimentos laterais, de uma ou mais camadas, ocasionados pela ação das cargas do tráfego (HENSLEY E LEAHY (1989); LAI E HUFFERD (1976) e ANANI *et al.* (1990)).

A seleção de materiais e o controle tecnológico são sempre soluções para a redução do potencial de defeitos de uma mistura asfáltica. Para Bernucci *et al.* (2008) misturas asfálticas mais rígidas podem ser mais resistentes à deformação permanente, entretanto essa característica depende da combinação de um grande número de fatores, não somente os relacionados particularmente aos materiais (tipo de agregado ou ligante asfáltico) e à mistura

asfáltica resultante (faixa granulométrica e volume de vazios), mas também à fatores externos condicionantes (temperatura e carga do tráfego).

No que se refere aos materiais, uma das alternativas que vem sendo estudada para a melhora no desempenho das misturas asfálticas é o uso de ligantes asfálticos modificados. Modificadores como polímeros permitem que a uma mistura asfáltica apresente rigidez adequada em amplos intervalos de temperaturas. Por isso, é possível obter melhoras tanto à resistência à fadiga quanto à deformação permanente.

Com relação à estabilidade estrutural de uma mistura asfáltica, essa pode ser estudada a partir da forma como ela se deforma ou flui ao longo do tempo em que dado carregamento é aplicado. Com esse objetivo, pesquisadores da Shell, em busca de métodos simples que permitissem essa avaliação, desenvolveram o ensaio de fluência por compressão uniaxial, também conhecido por ensaio de *creep* (COELHO, 1996).

Inicialmente o ensaio de *creep* estático foi adotado pelos pesquisadores por se tratar de um ensaio que alia vantagens como o simples manuseio e o baixo custo, porém estudos constataram que o ensaio de *creep* dinâmico permite representar condições próximas às que o pavimento será submetido durante seu tempo de serviço, isto devido ao tipo de carregamento aplicado sobre um corpo de prova de mistura asfáltica.

1.2. OBJETIVOS

O objetivo desse trabalho é contribuir para o entendimento da deformação permanente das misturas asfálticas focando a importância do efeito dos fatores (a) modificador, (b) aditivo, (c) volume de vazios, (d) variação de temperatura e (e) variação de tensão nas propriedades mecânicas das misturas.

Para isso, foram realizados ensaios mecânicos de módulo de resiliência, *creep* dinâmico, *creep* estático, e resistência à tração por compressão diametral. Espera-se identificar a importância de cada fator, assim como de suas interações na contribuição para a estabilidade das misturas asfálticas densas.

1.3. ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Este trabalho possui 5 capítulos, sendo: (1) considerações iniciais; (2) revisão bibliográfica; (3) materiais e métodos; (4) apresentação e discussão dos resultados e (5) conclusões.

O capítulo 2 é composto por uma revisão bibliográfica que aborda temas a respeito do comportamento das misturas asfálticas quanto à deformação permanente e dos ensaios de *creep* estático e dinâmico.

No capítulo 3 são apresentados o programa experimental e os materiais utilizados nessa pesquisa, além dos métodos que foram utilizados para a avaliação das propriedades mecânicas das misturas asfálticas, sendo eles: módulo de resiliência, ensaios de fluência por compressão uniaxial dinâmica e estática; e resistência à tração por compressão diametral.

O capítulo 4 apresenta e analisa o efeito das variáveis do programa experimental no comportamento mecânico das misturas asfálticas; para os ensaios de propriedades mecânicas o efeito das variáveis é apresentado na seguinte ordem: modificador; adição da cal; variação do volume de vazios; variação da temperatura e variação do nível de tensão do respectivo ensaio.

No capítulo 5 são apresentadas as conclusões, sendo um subitem para cada variável do programa experimental, de modo a retratar como essas variáveis podem vir a contribuir ou prejudicar o desempenho das misturas asfálticas. Também foi feita uma comparação entre os dois ensaios de fluência por compressão uniaxial, dinâmico e estático. Adicionalmente, são feitas sugestões para futuras pesquisas.

CAPÍTULO

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. DEFORMAÇÃO PERMANENTE

A deformação permanente é um dos principais mecanismos de deterioração dos pavimentos asfálticos que causa o comprometimento (às vezes) prematuro do seu desempenho em serviço. No revestimento asfáltico, a deformação permanente é observada na forma de afundamento em trilha de rodas (ATR), que podem apresentar ou não elevações laterais (YODER e WITCZAK, 1975).

O afundamento em trilha de rodas se desenvolve gradativamente com o aumento do número de solicitações das cargas do tráfego, formando uma distorção na superfície que pode ser decorrente da consolidação ou de ruptura localizada em uma ou mais camadas do pavimento ou do subleito (LAI E HUFFERD (1976); HENSLEY E LEAHY (1989); ANANI *et al.* (1990); COELHO (1996), SANTANNA-GRECO (2004)). O aparecimento da deformação permanente está relacionado, em muitos casos, ao afundamento das camadas de base, sub-base ou subleito que podem ocorrer a partir do momento em que o pavimento recebe cargas superiores àsquelas para as quais foi projetado, ou devido a falhas na etapa de compactação.

Quando a mistura asfáltica apresenta densidade adequada, o mecanismo responsável pela formação do afundamento em trilha de rodas é a deformação cisalhante; entretanto, quando a compactação é inadequada ou insuficiente, o afundamento em trilhas de rodas é decorrente da consolidação ou densificação dos materiais que compõem o pavimento (NASCIMENTO, 2008). Cada material deve, portanto, responder de forma particular aos esforços do tráfego; inclusive com relação à intensidade dos efeitos.

Nesse sentido, Hofstra e Klomp¹ (1972) *apud* Souza *et al.* (1991) verificaram que as deformações que ocorrem no pavimento asfáltico são maiores quanto mais próxima da superfície estiver localizada a camada. Esse fenômeno pode ser explicado considerando que, com o aumento da profundidade, o efeito do confinamento é maior e o efeito das tensões de cisalhamento é menor, resultando em maiores resistências à deformação por movimentação plástica (SOUZA *et al.* 1991).

Na década de 60, as pesquisas realizadas na pista experimental da AASHO permitiram entender não somente as parcelas de influência das camadas do pavimento na deformação permanente do revestimento do pavimento; mas também do tempo. Foi observado que o acúmulo de deformação no primeiro ano de testes foi maior que o acúmulo do segundo ano (Highway Research Board² (1962) *apud* Coelho (1996)).

Em concordância com essas conclusões, Eisenmann e Hilmer³ (1987) *apud* Coelho (1996) verificaram que a taxa de aumento das profundidades das trilhas de roda são maiores no início do processo de solicitação da camada asfáltica e que, com o tempo, a taxa tende para um valor aproximadamente constante após um determinado número de solicitações ser atingido. Segundo esses autores, quando o afundamento em trilha de rodas ocorre somente na camada asfáltica, esse deve-se à fluência do material (ou fluxo de deformação) podendo apresentar ou não variação de volume.

Segundo Nascimento (2008), alguns fatores podem contribuir para o afundamento de trilha de rodas, como os relacionados ao agregado (granulometria, tamanho, forma, textura, angularidade dos agregados graúdos e miúdos, e geometria e propriedade do fíler), ao ligante

¹ HOFSTRA, A; KLOMP, A.J.G. The modulus of asphalt layers at high temperatures: comparison of laboratory measurement under simulated traffic conditions with theory. In: **Third International Conference on the Structure Design of Asphalt Pavements**, Londres, 1972. Proceedings, Vol. I. Londres, Inglaterra, 1972. p. 613-621

² HBR – Highway Research Board. The AASHO Road Test. Highway Research Board, **Special Report 61A, Publication N°816**. Washington, D.C., 1963.

³ EISENMANN, J.; HILMER, A. Influence of Wheel load and inflation pressure on the rutting effect at asphalt-pavements – Experiments and theoretical investigations. In: **International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements**. Ann Arbor, 1987. Proceedings, Vol. I. Ann Arbor, EUA, 1987. p. 392-403.

asfáltico (Grau de Desempenho (PG), teor e afinidade entre o asfalto e agregado) e aos condicionantes externos (clima, carga de tráfego, velocidade do tráfego).

2.2. FATORES INFLUENTES NO DESENVOLVIMENTO DA DEFORMAÇÃO PERMANENTE

2.2.1. Ligante Asfáltico

O ligante asfáltico exerce um papel importante na estabilidade da mistura asfáltica. Dentre suas características, podem ser citadas a viscosidade, o teor e a modificação do asfalto como propriedades mais relevantes do ligante. Com relação à viscosidade, Mahboub e Little⁴ (1988) *apud* Nascimento (2008) relataram que o uso de ligante asfáltico menos viscosos tornam as misturas betuminosas menos rígidas e, conseqüentemente, mais suscetíveis ao aparecimento de deformação permanente. Para resolver este tipo de problema, diversos pesquisadores e engenheiros recorreram ao uso de modificadores, como polímeros, microfíleres, aditivos químicos, entre outros, com o objetivo de aumentar a viscosidade do ligante asfáltico sem que esta mudança prejudicasse o desempenho da mistura asfáltica em épocas de baixa temperatura. Moura (2010) avaliando misturas com asfaltos convencionais e modificados concluiu que o uso de asfalto convencional mais consistente ou a modificação com polímero ou borracha, contribuiu significativamente para a redução da deformação permanente causada pela fluência do material.

Kamel e Miller (1994) já haviam concluído que o uso de modificadores em ligantes asfálticos proporciona reduções consideráveis no afundamento de trilha de rodas. A mistura asfáltica com ligante asfáltico modificado com polímero SBS proporcionou uma redução em mais de 50% da deformação permanente e um aumento da vida de fadiga em mais de 300%. Concluiu-se, então, que certos modificadores favorecem a melhora no desempenho em alta temperatura sem afetar o comportamento à fadiga em temperaturas mais amenas.

⁴ MAHBOUB, K; LITTLE, D. N. L. Improved Asphalt Concrete Design Procedure, **Research Report 474-IF**. Texas Transportation Institute. College Station, Texas, 1988.

Segundo Hunter (2000), a modificação do asfalto com polímeros pode tornar a mistura mais flexível em baixas temperaturas e mais rígida a temperaturas elevadas, melhorando concomitantemente características relacionadas à fadiga e à deformação permanente. Contudo, para uma modificação eficiente, considera-se não somente o teor e o tipo do modificador a ser empregado, mas também o tipo de ligante asfáltico original.

Bernucci *et al.* (2002), estudando comparativamente o comportamento mecânico de misturas asfálticas com ligantes asfálticos convencionais e modificados por borracha e polímeros, concluíram que (a) misturas produzidas com asfalto-borracha apresentaram grande estabilidade estrutural, alta flexibilidade e menor rigidez nas condições de serviço, e; (b) misturas com ligante asfáltico modificado com SBS e SBR apresentaram maior flexibilidade e um maior retorno elástico, culminando num aumento da vida de fadiga e numa redução importante na deformação permanente.

Outro fator importante no comportamento das misturas asfálticas à deformação permanente é o teor de ligante asfáltico. Segundo Brousseau *et al.* (1993) *apud* Moura (2010), há alta probabilidade de ocorrência de deformação permanente em misturas ricas em ligante asfáltico. Esse efeito é explicado considerando que o aumento da espessura do filme asfáltico em torno dos agregados distancia as partículas dos agregados e ocasiona um aumento da mobilidade entre elas; esse aumento da lubrificação reduz uma parcela da resistência ao cisalhamento desenvolvida pelo atrito entre grãos.

Para Moura (2010) o problema é identificar qual incremento no teor de ligante asfáltico é danoso ao comportamento das misturas quanto à deformação permanente. Esse fator, contudo, depende também da distribuição granulométrica dos agregados, uma vez que existem graduações mais sensíveis que outras, ou seja, que a uma pequena mudança no teor ou do tipo de ligante asfáltico respondem com aumento significativo da deformação permanente.

No Brasil, a norma DNIT 031/2004 - ES especifica que o limite aceitável de variação do teor de ligante asfáltico é de $\pm 0,3\%$ para a fabricação da mistura asfáltica. Nesse sentido, Moura (2010) alerta que existem certos tipos de misturas que são mais sensíveis à variação do teor de ligante asfáltico que, em resposta a esse incremento ($+0,3\%$), podem apresentar deformações importantes e prejudiciais ao serviço do revestimento. Bernucci *et al.* (2008),

avaliando misturas asfálticas dosadas a partir do método Marshall, tendo o teor de ligante asfáltico variando nos limites aceitáveis pela norma brasileira DNIT 031/2004 - ES, concluíram que as misturas asfálticas densas bem graduadas foram as que apresentaram mais problemas relacionados à deformação permanente diante de pequenas variações dos teores de ligante asfáltico.

2.2.2. Agregados

Os agregados empregados em revestimentos asfálticos devem ser materiais granulares inertes ligados entre si por um ligante asfáltico. O comportamento de uma mistura asfáltica em serviço pode também ser entendido a partir das propriedades dos agregados. A composição mineralógica e a dureza dos materiais pétreos levam à formação dos planos de ruptura no processo de britagem, produzindo formas, angularidades e polaridades particulares ao agregado produzido.

Uge e Van de Loo (1974), avaliando o efeito da forma dos agregados na deformação permanente, encontraram que misturas asfálticas compostas por agregados britados são mais estáveis, ou seja, menos suscetíveis à deformação permanente que misturas com agregados arredondados (seixo rolado). Para Roberts *et al.* (1996), o bom comportamento de misturas compostas por agregados britados se deve ao melhor intertravamento (atrito interno) comparado às partículas arredondadas, resultando em um aumento na resistência à deformação permanente.

Quanto à forma dos agregados, é bastante consolidado o conhecimento que (a) agregados esféricos leva à intertravamentos pobres, que produz a movimentação das partículas umas sobre as outras em resposta aos esforços solicitantes, e (b) agregados lamelares são mais suscetíveis à quebra podendo levar ao aumento do consumo de asfalto, ao aumento do volume de vazios, à estratificação da mistura e à diminuição da resistência da mistura. Por conseguinte, a forma mais indicada dos agregados a serem usados em pavimentação é a cúbica, que resultam em maior atrito interno, maior resistência e em menores taxas de quebras dos agregados em operações de mistura, aplicação e compactação das misturas asfálticas (BUTTON *et al.* 1999).

O fíler ou material de preenchimento é objeto de estudo em muitas pesquisas devido a sua influência nas propriedades do mástique e no desempenho das misturas. O fíler atua como material de preenchimento, preenchendo parte dos vazios da mistura e aumentando sua estabilidade; para desempenhar essas funções, são normalmente empregados materiais inertes como o pó de pedra. Quando, no entanto, o fíler selecionado atua como material ativo, ele altera propriedades das misturas asfálticas, melhorando sua trabalhabilidade e a estabilidade, aumentando sua rigidez e resistência ao envelhecimento e ao dano por umidade.

Um dos fíleres ativo mais popular empregado em misturas asfálticas é a cal hidratada. A cal promove efeitos mais significativos, em comparação com outros fíleres como o cimento e o pó de pedra devido ao reduzido diâmetro das partículas, em geral, menor ou igual a 20 µm. Sendo assim, há uma condição geométrica adequada para que as partículas de cal se concentrem na película do ligante asfáltico, implicando em mudanças nas características reológicas originais do ligante asfáltico.

Para Mohammad *et al.*(2000), a cal é formada por partículas com frações de diferentes tamanhos, tendo as frações de maior tamanho atuando como fíler aumentando a rigidez da mistura asfáltica, e as de menor tamanho sendo responsáveis pelo enrijecimento do filme do ligante asfáltico, melhorando a viscosidade e a coesão do ligante asfáltico, deste modo o cimento asfáltico recobre as partículas de agregado com uma película mais consistente promovendo o aumento da resistência da ligação adesiva entre o agregado e o ligante asfáltico. Para esses autores os mecanismos acima contribuem para a redução da segregação da mistura asfáltica que possui a cal como fíler ativo.

Grande parte das pesquisas sobre o efeito da cal nas misturas asfálticas focam a cal como melhorador de adesividade e durabilidade. Porém, para isso são também avaliadas propriedades mecânicas relacionadas à resistência, à flexibilidade e ao envelhecimento. Nesse sentido, muitos pesquisadores têm observado variações importantes das características e propriedades mecânicas das misturas asfálticas, que sugerem que, de forma geral, a cal:

- (a) Aumenta a consistência do asfalto, podendo haver redução no consumo de ligante asfáltico, e também aumenta a rigidez e resistência à tração das misturas asfálticas (Wesseling *et al.*, 2003);

- (b) Melhora a resistência à ação danosa da água (Hicks, 1991), e;
- (c) Reduz o potencial do ligante asfáltico de se deformar em altas temperaturas e o potencial de deformação permanente (Epps e Little, 2001).

A melhora da rigidez e a redução da deformação permanente das misturas asfálticas estão relacionadas ao tipo da cal como fíler mineral, pois este tipo de material diferente dos demais é quimicamente ativo, resultando em mudanças reológicas do ligante asfáltico que contribuem para o bom desempenho da mistura asfáltica tanto em elevadas temperaturas quanto em temperaturas mais amenas, condição que favorece a formação de trincas térmicas (LIME 2006; SENGUL *et al.* 2011).

O ganho da rigidez em consequência da adição da cal na mistura asfáltica é de grande impacto nas suas características, sendo possível aumentar o grau de desempenho (*performance grade* – PG) do ligante asfáltico com a adição da cal no concreto asfáltico. Em estudo realizado por Mohammad *et al.* (2008) foi observado que uma mistura com CAP PG 70-22 e cal, tanto em elevada temperatura quanto em temperatura intermediária, essa apresentou melhora no desempenho chegando quase ao equivalente de uma mistura convencional com ligante asfáltico PG 76-22. Segundo relato de Little e Petersen (2005) esse ganho na rigidez da mistura asfáltica não representa que as misturas com cal venham a se tornar mais frágeis em baixas temperaturas, pois nessas condições a cal é quimicamente menos ativa vindo a se comportar como qualquer outro fíler inerte. Mohammad *et al.* (2008) enfatizam ainda que os benefícios da cal foram mais evidentes nas condições de elevada temperatura, particularmente nas misturas com ligante asfáltico modificado por polímero.

Os benefícios do uso da cal podem ser ainda maior quando esse é usado em conjunto com polímeros modificados. Mohammad *et al.* (2000) realizou um estudo utilizando misturas asfálticas modificada com polímero SB, e Özen (2010) com polímero SBS, ambos constataram que com a adição da cal na mistura asfáltica com ligante modificado com os respectivos polímeros apresentaram melhor desempenho comparada às demais misturas pesquisadas. Mohammad *et al.* (2000) ainda complementou relatando que esse efeito foi mais evidente em elevada temperatura.

As misturas asfálticas apresentam uma composição granulométrica, onde as frações de materiais pétreos (gráudo, miúdo e finos) são selecionadas e enquadradas de tal forma que resulte em uma das distribuições granulométricas aplicáveis em revestimentos asfálticos. Assim, além da propriedade do material pétreo, é avaliada a combinação das frações e sua densificação; nesta fase do projeto, é preponderante que se considere a característica ou a função do revestimento, ou seja, se a mistura asfáltica a ser empregada deve apresentar características de rigidez, flexibilidade, durabilidade ou permeabilidade particulares.

No que se refere às características ou funções do revestimento, os fatores a serem observados são: a distribuição granulométrica, o atrito entre partículas e o teor de finos. Em termos de deformação permanente, a granulometria pode ser considerada a característica mais importante da mistura asfáltica, uma vez que influencia nas propriedades mecânicas, hidráulicas e de durabilidade das misturas asfálticas (ROBERTS *et al.*, 1996).

Teoricamente, a melhor granulometria é aquela que oferece o melhor intertravamento entre os agregados, resultando em máxima densidade. Com esse arranjo seria possível o aumento da estabilidade em função (a) dos numerosos pontos de contato entre as partículas e (b) da diminuição na porcentagem de vazios do agregado mineral (VAM). Contudo, na prática esse arranjo não é aceitável, pois é necessário um espaço mínimo que possibilite a incorporação da quantidade adequada de ligante asfáltico para que a mistura asfáltica apresente durabilidade ao longo dos anos em serviço, além dos vazios com ar para evitar a exsudação da mistura e a instabilidade da mistura asfáltica.

Segundo Gigante (2007), há uma grande variedade de tipos de misturas asfálticas para revestimentos, e cada uma apresenta uma granulometria específica que produz um tipo de imbricação e de resistência. Nas misturas asfálticas de granulometria contínua, a resistência é assegurada por meio da máxima densidade, que é o caso dos concretos asfálticos; já nas de granulometria descontínua, o esqueleto de agregado gráudo produz o atrito interno e o mástique preenche os vazios aumentando a estabilidade, que é o caso das misturas tipo *Stone Matrix Asphalt* (SMA) (HORST, 2000).

Goetz e Wood⁵ (1960) *apud* Coelho (1996) já sinalizavam que dada porção de agregados graúdos oferece um esqueleto mineral com um número adequado de pontos de contato entre os agregados e, com isso, espera-se algum aumento na resistência por atrito interno; tal resistência é particularmente importante em regiões de clima quente. Para Davis (1987) *apud* Coelho (1996), nessa condição climática, o efeito da viscosidade do ligante na estabilidade da mistura asfáltica pode não ser positivo, pois o ligante asfáltico encontra-se exposto a temperaturas mais altas e, por sua vez, mais próximo do seu ponto de amolecimento. Assim sendo, a resistência à deformação permanente será mais dependente da resistência oferecida pelo intertravamento dos agregados que propriamente à oferecida pela viscosidade do ligante asfáltico, mas, Davis (1987) *apud* Coelho (1996) destacou que para produzir misturas asfálticas de melhores desempenhos é indispensável avaliar melhores combinações de composição granulométrica, tamanho máximo dos agregados, teor de asfalto e volume de vazios.

Souza *et al.* (1991), avaliando o efeito da composição granulométrica na deformação permanente de concretos asfálticos, observaram que as misturas densas compostas com 30% de areia britada, em geral, apresentaram maior estabilidade e maior rigidez quando comparadas às misturas uniformes compostas de agregados graúdos (de granulometria aberta). Entretanto, os autores destacaram que, mesmo misturas densas tendo apresentado melhoras em algumas propriedades mecânicas, o contato entre as partículas é mais importante que a quantidade da fração areia.

2.2.3. Mistura Asfáltica

Linden *et al.* (1989) focaram em sua pesquisa o efeito da variação do volume de vazios na estabilidade das misturas asfálticas e concluíram que o aumento de 1% no volume de vazios (tendo como referência $V_v=7\%$) pode provocar uma redução de aproximadamente 10% na vida de serviço do pavimento. De acordo com Souza *et al.* (1991), o aumento do V_v torna o revestimento asfáltico mais suscetível ao efeito de consolidação nas trilhas de roda

⁵ GOETZ, William H.; WOOD, L. E. Bituminous materials an mixtures, Section 18. In: WOODS, Kenneth B., Highway Engineering Handbook, Mc-Graw-Hill Book Company, New York. EUA, 1960. 1696 p.

que por densificação, apresentando depressões longitudinais sem elevações laterais. O elevado volume de vazios de um revestimento asfáltico pode permitir a entrada de água e ar, e assim contribuir para o aparecimento de danos na mistura asfáltica decorrentes da umidade, e o envelhecimento precoce do ligante asfáltico (HUBER,1999).

A relação entre baixo volume de vazios e deformação permanente também é descrita por Souza *et al.*(1991). Segundo o autor, as misturas asfálticas ricas em ligante asfáltico e baixo índice de volume de vazios (inferiores a 4%) são suscetíveis à deformação permanente por movimentação plástica, caracterizada por um afundamento nas trilhas de roda juntamente de pequenas elevações laterais. Esse efeito ocorre em consequência da redução do volume de vazios devido ao preenchimento desses espaços com o elevado teor de ligante asfáltico, fazendo com que o ligante exerça o papel de lubrificante entre as partículas de agregados. Em ocasiões de elevadas temperaturas, misturas com essas características apresentam um aumento da suscetibilidade ao afundamento de trilha de rodas, pois o ligante asfáltico nessa condição climática se torna menos viscoso e facilita mais as deformações por cisalhamento.

Moura (2010) também afirma que para as regiões tropicais, onde a temperatura anual é elevada, é recomendável que o volume de vazios final, ou seja, resultante da pós-compactação pela ação do tráfego, seja preferencialmente superior a 3%.

Al-Abdul Wahhab *et al.* (1995), monitorando rodovias da Arábia Saudita, relacionaram a deformação permanente precoce das camadas de base e revestimento com a porcentagem do volume de vazios *in-situ* da mistura, afirmando que a probabilidade do aparecimento desse tipo de deformação pode ser reduzida com volume de vazios inferior à 5%.

2.3. ENSAIO DE CREEP

2.3.1. Introdução

Segundo Little (1992), o maior responsável pela ruptura em misturas asfálticas está relacionado à deformação devido à fluência. A fluência ocorre em revestimentos asfálticos submetidos a situações de carregamentos de longa duração e/ou expostos a elevadas temperaturas, além de outros fatores como, por exemplo, o uso de ligantes asfálticos de baixa

consistência ou misturas com alto teor de asfalto. A estabilidade estrutural de uma mistura pode ser determinada a partir da análise da sua taxa de deformação, em outras palavras, da sua capacidade de fluir em função do tempo e da magnitude do carregamento.

Com esse objetivo, pesquisadores da Shell, em busca de métodos simplificados que permitissem essa avaliação, desenvolveram o ensaio de fluência por compressão uniaxial, também conhecido por ensaio de *creep*. A partir da década de 1970, esse ensaio passou a ser utilizado em grande escala, e destacou-se a partir das pesquisas realizadas pelo laboratório da Shell (“Koninklijke/ Shell-Laboratorium”), em Amsterdã, na Holanda (COELHO, 1996).

O ensaio pode ser realizado em duas condições de carregamento, uma em que o carregamento aplicado sobre o corpo-de-prova é repetido/cíclico e a outra constante, chamados de ensaio de *creep* dinâmico e estático, respectivamente.

Para Little *et al.* (1993), as condições de ensaios de carregamentos cíclicos permitem reproduzir situações próximas a encontrada em campo e retratar melhor a suscetibilidade à deformação permanente da mistura asfáltica. Porém, vale ressaltar que o ensaio de fluência por compressão uniaxial estática pode ser também utilizado para esse fim, com a vantagem da simplicidade do equipamento necessário para a sua realização. Mahboub (1990), comparando os dois modos de ensaios (carregamentos estáticos e dinâmicos), constatou que materiais viscoelásticos apresentam uma maior suscetibilidade à deformação permanente quando recebem carregamentos estáticos.

Porém, Valkering *et al.* (1990) constataram que o ensaio de *creep* estático não detectou diferenças na resistência à deformação permanente entre misturas com ligante asfáltico convencional e modificados por polímero, mesmo sendo elas reologicamente diferentes devido à modificação com o polímero SBS. Tayebali *et al.* (1992) acreditam que este comportamento é devido ao tipo de carregamento aplicado sobre o corpo de prova no ensaio de *creep* estático, pois na mistura asfáltica a resistência a deformação permanente é melhor representada pela deformação acumulada, obtida de ensaios que simulem as cargas repetidas exercidas pelo tráfego, como no caso do ensaio de *creep* dinâmico.

2.3.2. Ensaio de *Creep* Estático

O ensaio de *creep* estático foi desenvolvido a partir de modelos teóricos que permitem avaliar a deformação ocorrida nas misturas asfálticas. Esses modelos foram desenvolvidos com base nas teorias estabelecidas por Hills (1973), essas que consideram as misturas asfálticas como sistemas constituídos de partículas de agregado mineral envolvidas por películas de ligante asfáltico, e a presença de vazios entre as partículas.

As hipóteses dos modelos de Hills (1973) são:

- (a) as deformações são decorrentes do deslocamento relativo entre as partículas (deformação cisalhante ocorrida no ligante asfáltico);
- (b) para um nível constante de tensão, a velocidade relativa de deslocamento entre duas partículas de agregado é em função da espessura da película asfáltica que as separa, e;
- (c) no momento em que a mistura é submetida a uma força de compressão, a força normal que age entre duas partículas adjacentes há de comprimir o ligante fazendo com que ele preencha os vazios existentes na mistura.

Para a sistematização dos modelos, Hills (1973) considerou um comportamento viscoelástico para as misturas asfálticas, e a proporcionalidade entre as tensões e deformações. Em seguida, foram montados três modelos de deformação a partir do isolamento de um par de partículas de agregado mineral, e essas separadas por uma película de ligante asfáltico. Os objetivos desses modelos foram de retratar o comportamento mecânico de uma mistura no momento em que essa é submetida à fluência, e prever a deformação que a mistura pode apresentar após um carregamento de longa duração, considerando que o movimento relativo das partículas do agregado promove diversos arranjos que atenda às condições de equilíbrio. Mas, de acordo com Hills (1973), o processo não é completamente reversível, pois no momento do descarregamento, o equilíbrio é alcançado com a recuperação da componente elástica retardada.

Segundo Roberts *et al.* (1996), o ensaio de fluência estático apresenta três condições de carregamento: uniaxial estático com/e sem confinamento e tração indireta. Os dois primeiros têm como objetivo a previsão da deformação permanente, e o último a verificação do potencial na formação de trincas em baixa temperatura. Entre esses ensaios, o mais

utilizado é o de carga estática sem confinamento, pela facilidade no manuseio e pelo baixo custo.

2.3.2.1. Efeito da tensão no ensaio de creep estático

Com o decorrer do tempo, outros pesquisadores vieram a estudar o comportamento das misturas asfálticas utilizando o ensaio de *creep* estático e com isso surgiram contradições com relação ao carregamento a ser aplicado durante a realização do ensaio.

Para Van de Loo (1974), o correto seria a aplicação de cargas de baixa intensidade, para que deste modo fosse possível representar o estado viscoelástico linear de uma mistura, por outro lado, Little *et al.* (1993) consideram que os ensaios de fluência deveriam reproduzir as condições reais em campo, portanto assumir temperaturas e níveis de tensão mais realistas.

A Figura 2.1 apresenta o gráfico de deformação *versus* tempo de carregamento obtido a partir do ensaio de *creep* estático, onde é possível visualizar os três estágios de fluência que ocorrem durante o ensaio, denominados de estágios primário, secundário e terciário.

Figura 2.1. Representação dos estágios de deformação por fluência do ensaio de *creep* estático (Little *et al.*, 1993).

No estágio primário a inclinação inicial da curva de fluência é elevada, a taxa de deformação cresce rapidamente com o tempo de carregamento, isso porque ocorrem grandes deformações em um curto período de aplicação da carga. Para Mohamed e Yue (1994), essa elevada taxa de deformação inicial é devida à concentração de tensão em pontos salientes na

superfície do corpo de prova, em muitos casos irregulares. Outra justificativa seria o efeito de densificação do corpo de prova em consequência da redução do volume de vazios.

O estágio secundário é identificado pela taxa constante de aumento de deformação. Como pode ser visto na Figura 2.1, é o momento em que a curva de fluência apresenta inclinação constante. Nesse estágio, o arranjo das partículas de agregado já se encontra adequado para o nível de energia aplicado pelo ensaio, portanto, a partir desse momento a deformação permanente ocorre principalmente pela ação da fluência por cisalhamento. A estabilidade mecânica da mistura asfáltica é estabelecida nesse estágio do ensaio, tendo que quanto maior a inclinação da curva de fluência, maior a suscetibilidade da mistura à deformação permanente.

O estágio terciário ou estágio de ruptura é caracterizado pelo brusco crescimento da deformação permanente até o rompimento do corpo de prova. As possíveis causas para o acontecimento desse estágio durante um ensaio são o uso de corpos de prova heterogêneos; a excentricidade da placa de carregamento e as superfícies inclinadas dos corpos de prova.

Traçando-se uma curva do logaritmo da taxa de fluência em função da tensão de fluência, é possível obter um gráfico que retrata a influência da tensão na velocidade da deformação de fluência (Little *et al.*, 1993), como ilustra a Figura 2.2.

Figura 2.2. Influência da intensidade de tensão na velocidade de deformação de fluência (Little *et al.*, 1993)

A partir dessa curva, Little *et al.* (1993) concluíram que para baixos níveis de tensão, a velocidade de fluência é baixa, não sendo relevante para o estudo em prática. Em níveis

médios de tensão, a relação entre o logaritmo da velocidade de fluência e a intensidade de tensão é aproximadamente linear, sendo esses os níveis de tensão mais indicados para a realização do ensaio. Já para os níveis de tensão próximos à ruptura do material, a relação não é linear entre as variantes, e apresenta uma aceleração da fluência com o aumento da tensão.

Alguns autores defendem a ideia de se adotar a tensão de ensaio entre 0,0345 e 0,1380 MPa, para que se possa trabalhar na região que corresponde a viscoelasticidade linear do material, e assim utilizar essa teoria para análise das tensões e deformações, porém esses níveis de tensão não correspondem aos que ocorrem em serviço (ROBERT⁶ *et al.* (1988) *apud* LITTLE *et al.* (1993)). Além disso, no domínio da viscoelasticidade, as tensões próximas de ruptura, as misturas asfálticas não respondem dessa maneira, deste modo Santanna-Greco (2004) considerou que o mais indicado é adotar tensões de ensaio próximas às de serviço.

2.3.3. Métodos e Critérios para Avaliação da Mistura Asfáltica

Van de Loo (1976) apresentou o Método Shell que permite estimar a deformação permanente com o uso do ensaio de *creep* estático. A deformação é estimada a partir dos valores do módulo de rigidez da mistura asfáltica em função do módulo de rigidez do ligante asfáltico, podendo ser calculada a partir da expressão 2.1:

$$h = HC_m Z \frac{\sigma_{contato}}{S_{mix}} \quad (2.1)$$

Onde:

h = Profundidade da trilha de roda;

H = Espessura da camada asfáltica;

C_m = Fator de correção Shell para efeito dinâmico (1 a 2);

Z = Fator de distribuição da tensão de compressão;

⁶ ROBERT, F. L.; TIELKING, J.T.; MIDDLETON, D.; LYTTON, R.L. E TSENG, K.H. (1988). Effects of tire pressure on flexible pavements. Report 372-1F. Texas Transportation Institute, p. 223-235 *apud* LITTLE, D.N.; BUTTON, J.W. e YOUSSEF, H. (1993). Development of criteria to evaluate uniaxial creep data and asphalt concrete permanent deformation potential. Transportation Research Record, 1417, p.54.

σ_{contato} = Pressão de contato dos pneus;

S_{mix} = Rigidez da mistura.

De acordo com Van de Loo (1978), S_{mix} corresponde à componente viscosa da rigidez da mistura ($S_{\text{mix, visc}}$), podendo ser obtida com o auxílio de curvas de comportamento elaboradas pelos pesquisadores da Shell. Essas curvas relacionam S_{mix} com S_{asf} , sendo $S_{\text{asf}} = S_{\text{asf, visc}}$, e pode ser calculado a partir da expressão 2.2:

$$S_{\text{asf}} = \frac{3\eta}{Nt} \quad (2.2)$$

Onde:

S_{asf} = Rigidez do ligante asfáltico;

N = Número de aplicações de carga;

t = Tempo de um ciclo de carregamento (s);

η = Viscosidade do ligante asfáltico (Ns/m^2).

Os critérios de avaliação definidos por Van de Loo (1974) foram baseados no módulo de fluência, expresso pela relação entre a tensão aplicada e a deformação relativa. Alguns desses critérios foram resumidos por Little *et al.* (1993) e podem ser visualizados na Tabela 2.1.

Tabela 2.1. Critérios de avaliação do módulo de fluência estabelecido para o ensaio de fluência por compressão uniaxial estática (Fonte: Santanna-Greco, 2004).

<u>Critério</u>	<u>Tempo de Carreg. (min)</u>	<u>Temp. do Ensaio (°C)</u>	<u>Nível de Tensão (MPa)</u>	<u>Mód. de Fluência Mínimo (MPa)</u>	<u>Condições</u>
Von Quintus <i>et al.</i> (1991)	60	40	0,345 a 0,414	68,9	Concreto asfáltico sobre base rígida
				55,1	Superf. de uma camada de concreto asfáltico espessa
				27,6	Revestimento asfáltico superficial

Viljoen e Meadows (1981)	100	40	0,207	82,1	
Khedr (1986)	60	40	0,207	137,9	
Kronfuss <i>et al.</i> (1984)	60	40	0,103	20,7	Intensidade de tráfego baixa
				20,7 – 31,0	Intensidade de tráfego moderada
				31,0 – 45,3	Intensidade de tráfego alta
Souza <i>et al.</i> (1991)	60	40	0,207	69	

A repercussão do ensaio de *creep* estático ocorreu devido à publicação do uso desse método em trabalhos realizados por pesquisadores da Shell. Com o decorrer do tempo, surgiram diversos critérios e métodos para a avaliação dos resultados obtidos por meio desse ensaio (TAIRA, 2001).

Os critérios de avaliação estabelecidos por Little *et al.* (1993) analisam o comportamento da mistura asfáltica quanto à deformação permanente. Esses critérios são baseados em dados fornecidos pelo Instituto de Transportes do Texas e são discutidos a seguir. A Tabela 2.2 apresenta critérios relacionados à deformação total após 1 hora de ensaio e a inclinação da curva de fluência no estágio secundário. Esse estágio foi adotado pelos autores por representar o trecho em que a curva deformação *versus* tempo de carregamento apresenta uma inclinação constante. Esses critérios têm como objetivo reduzir o potencial de deformação permanente que a mistura asfáltica possa vir a apresentar.

Tabela 2.2. Valores limites para a deformação após 1 hora de ensaio de *creep* e para inclinação da curva de fluência no estágio secundário (Fonte: Little *et al.*, 1993).

<u>Deformação Total Após 1h de Ensaio (%)</u>	<u>Inclinação da Curva de Fluência no Estágio Secundário</u>					
	< 0,17	< 0,20	< 0,25	< 0,30	< 0,35	< 0,40
< 0,25	IV ²	IV ²	IV ²	IV ²	IV ²	III
< 0,40	IV ²	IV ²	IV ²	III ²	III ²	III ²
< 0,50	IV ²	IV ²	III ²	III ²	III ²	II
< 0,80	III ²	III ²	II	II	II	II
< 1,0	I	I	I	I	I ¹	
< 1,2	I ¹	I ¹	I ¹			

1 – Deve apresentar deformação permanente <0,8% aos 1800s de carregamento

2 – Respeitar o seguinte critério: $\epsilon_p < 0,5\epsilon_{qu} + \epsilon_{rt}$

Onde:

I – Intensidade de tráfego baixa: $< 10^5$ ESALs;

II – Intensidade tráfego moderada: entre 10^5 e 5×10^5 ESALs;

III – Intensidade tráfego alta: entre 5×10^5 e 10^6 ESALs;

IV – Intensidade tráfego muito alta: $> 10^6$ ESALs;

ESALs – Solicitação equivalente do eixo padrão de 8,2t.

Para Little *et al.* (1993), quando se trata do ensaio de *creep* estático, além de se respeitar os critérios estabelecidos na Tabela 2.2, deve-se também levar em consideração a soma da deformação permanente (ϵ_p) e a deformação elástica total (ϵ_{rt}), após 3600s de carregamento, determinada durante o ensaio de módulo de resiliência uniaxial normalizada pela ASTM D 3497, essa soma não pode exceder o limite de 50% da deformação (ϵ_{qu}) obtida pelo ensaio de compressão não confinada (AASHTO T 167). Esse critério pode ser descrito pela expressão 2.3:

$$\epsilon_p < 0,5\epsilon_{qu} + \epsilon_{rt} \quad (2.3)$$

Com a análise dos dados apresentados na Tabela 2.2, Little *et al.* (1993) concluíram que a inclinação máxima da curva de fluência (no estágio secundário em escala log-log) não deve ultrapassar o valor de 0,25. E para a deformação total, em ensaios que reproduzem as condições reais de tráfego, o valor limite corresponde a 0,203 mm/mm.

Little *et al.* (1993) também elaboraram critérios relacionados ao módulo de fluência após 1 hora de carregamento, como pode ser visualizado na Tabela 2.3, com base nesses valores é possível determinar a suscetibilidade à deformação permanente das misturas asfálticas. A intensidade do tráfego é representada do mesmo modo como se encontra na Tabela 2.2.

Tabela 2.3. Critérios relacionado ao módulo de fluência após 1 hora de carregamento (Fonte: Little *et al.*, 1993).

<u>Resistência à Deformação Permanente</u>	<u>Intensidade do Tráfego</u>	<u>Módulo de Fluência Mínimo (MPa) para o Ensaio de Creep Estático</u>		
		0,207 MPa	0,354 MPa	0,483 Mpa
Elevada resistência à deformação permanente	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 resistência à deformação permanente	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

2.3.4. Condições para o Ensaio de *Creep* Estático

Para Santanna-Greco (2004) a deformação total e a deformação recuperável são atribuídas a fatores como temperatura, tipo e condições de carregamento, estado de tensões, e tipos de misturas. Com isso, os parâmetros a serem adotados para o ensaio devem ser bem estabelecidos, para que os resultados sejam condizentes.

Little *et al.* (1993) defendeu a ideia do tempo de 1 hora de execução para o ensaio de fluência por compressão uniaxial estática, justificando que este tempo é suficiente para averiguar a ruptura da mistura asfáltica, e satisfatoriamente curto para que a sua execução seja viável. Outros pesquisadores, como Sá e Motta (1996), notaram que após o período de 1 hora de carregamento a maior parte da deformação já havia ocorrido e a partir desse momento a tendência era chegar a estabilização.

Com relação à temperatura, a temperatura usual de ensaios é 40 °C, por se aproximar das temperaturas médias anuais encontradas em regiões tropicais, como o Brasil, e assim reproduzir as condições mais próximas às encontrada em campo (TAIRA, 2001).

Quando se trata do nível de tensão, há uma divergência entre os pesquisadores, como já citado anteriormente. Portanto o ensaio pode ser efetuado em três níveis de tensão, sendo: 1 kgf/cm², recomendado pelo Van de Loo (1974) e adotado pelo Método Shell; 4 kgf/cm² sugerido por Little *et al.* (1993) por representar um nível de tensão média encontrada no centro da camada asfáltica em condições de serviço; e por fim o de 7 kgf/cm², seguido por Mohamed e Yue (1994) por ser um valor elevado capaz de simular a pressão de enchimento dos pneus de veículos comerciais e as condições mais próximas de serviço.

2.3.5. Ensaio de *Creep* Dinâmico

O ensaio de *creep* dinâmico é realizado quase da mesma maneira que o ensaio de *creep* estático, o que os diferencia é o carregamento e o tempo de duração do ensaio. Neste ensaio os corpos de provas são submetidos a cargas de compressão uniaxiais dinâmicas (pulsos de carga com duração de 1,0 s, sendo o carregamento de 0,1 s e o de recuperação de 0,9 s) durante 3600 s.

Kaloush e Witczak (2002) comentaram que em diversas pesquisas realizadas no decorrer dos anos vem se constatando que o ensaio de *creep* dinâmico tem grande capacidade de estimar a suscetibilidade de misturas asfálticas à deformação permanente. E ratificaram essa afirmação comentando sobre a pesquisa apresentada pela NCHRP, onde, entre os cinco testes de laboratório que foram utilizados no estudo, o ensaio de *creep* dinâmico foi o que apresentou a melhor correlação com as medidas de deformação permanente em campo e a alta capacidade de estimar o potencial de deformação das camadas do pavimento.

Para Little *et al.* (1993) e Mohamed e Yue (1994) essas vantagens apresentadas pelo ensaio de *creep* dinâmico estão relacionados à capacidade de simular as cargas que são aplicadas no pavimento a partir de cargas repetidas uniaxial de compressão sobre os corpos de prova. Ulmgren (1996) apontou o ensaio de *creep* dinâmico como uma alternativa para o estudo da deformação permanente das misturas asfálticas, pois sabe-se que o ensaio de trilha de roda, o mais indicado para este tipo de estudo, demanda tempo, investimento em equipamentos mais sofisticados, sendo, por isso dificilmente encontrado nos laboratórios de pavimentação.

Tayfur *et al.* (2007) comentaram que o ensaio de trilha de roda (do LCPC wheel-tracking test) e o ensaio de *creep* dinâmico apresentaram tendências similares para as misturas SMA estudadas, mostrando que esse ensaio é um bom indicador para misturas SMA. Porém Özen (2010), pesquisando misturas de graduação contínua, não encontrou uma correlação dos resultados do ensaio de *creep* dinâmico e os do ensaio de afundamento de trilha de roda do LCPC.

CAPÍTULO

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A estabilidade e outras propriedades de uma mistura asfáltica sofrem influências de inúmeros fatores. Essa pesquisa tem como objetivo estudar a deformação permanente em misturas asfálticas densas (tipo CAUQ). Para isso foi elaborado um programa de experimentos (fatorial) que contempla os seguintes fatores: (1) tipo de cimento asfáltico (CAP 50/70 e CAP 50/70+SBS), (2) aditivo (sem e com cal), (3) volume de vazios (4% e 7%), (4) temperatura de ensaio (40 e 50° C), (5) nível de tensão de carregamento de ensaio de *creep* (0,1 e 0,4 MPa) e (6) tipo de carregamento de ensaio de *creep* (estático e dinâmico).

As variações desses fatores buscaram responder questões específicas a eles relacionadas. Assim sendo, ao tratar diferentes tipos de ligante asfáltico, buscou-se entender em que condições a modificação do ligante asfáltico levou a melhoras da suscetibilidade à deformação permanente das misturas.

Para o uso de aditivo, que se refere à adição de cal, teve-se a intenção de como o uso desse aditivo refletiu no comportamento das misturas asfálticas à deformação permanente.

Com relação à variação no volume de vazios, buscou-se entender como as características volumétricas e/ou grau de compactação influíram na estabilidade da mistura asfáltica, permitindo apreciar o efeito dessa variável na deformação permanente.

Quanto à variação da temperatura de ensaio, tentou-se compreender a associação dessa variável (aumento da temperatura de 40 para 50° C) na suscetibilidade à deformação permanente das misturas asfálticas.

No que se refere à variação do nível de tensão e do tipo carregamento do ensaio de *creep*, teve-se objetivo de observar como as misturas asfálticas se comportaram sob diferentes

níveis de tensão e do tipo de carregamento, e assim notar particularidades comportamental decorrentes dessas mudanças.

As análises das misturas asfálticas foram desenvolvidas com base no conjunto de dados obtidos de ensaios mecânicos: módulo de resiliência, fluência por compressão uniaxial estática e dinâmica, e resistência à tração por compressão diametral. A seguir, neste capítulo, são apresentadas as descrições das características dos materiais e dos métodos aplicados nesta pesquisa.

3.2. MATERIAIS

3.2.1. Agregado

O agregado utilizado para compor a curva granulométrica da mistura asfáltica foi um granito, proveniente da cidade de Valinhos – SP, que foi fornecido pela Usina Paulista de Britagem Pedreira São Jerônimo LTDA.

Após a coleta do material, foi iniciada a etapa de enquadramento dos agregados na granulometria, nessa fase foi efetuada a separação do material em frações granulométricas para o enquadramento do agregado nos limites preconizados por norma. Para isso, primeiramente, o material foi lavado e levado para a estufa para secagem por um período de aproximadamente 12 horas, em seguida foi realizada a separação do material por meio de peneiramento manual.

A faixa granulométrica adotada para esse estudo foi a Faixa “C” normatizada pelo DNIT ES 031/2004, nesse caso a distribuição do agregado selecionada foi o centro da faixa, como mostra na Figura 3.1.

Figura 3.1. Faixa Granulométrica "C" – DNIT ES 031/2004

Com a etapa de separação, preparação e a escolha da faixa granulométrica do agregado concluída, deu-se início à pesagem dos agregados para a composição granulométrica de cada corpo de prova (1200 g), essa quantidade foi separada em sacos plásticos identificados como Faixa C e Faixa C (com cal). A composição foi realizada pesando a quantidade adequada de material referente a cada peneira para a confecção do corpo de prova respeitando os valores descritos na Tabela 3.1. O *aditivo* empregado nas misturas asfálticas foi uma cal hidratada cálcica tipo CH1 (Supercal®). A quantidade de cal acrescentada às misturas foi de 1,5% em relação à quantidade total dos agregados.

Tabela 3.1. Porcentagem e quantidade de material de cada fração de agregado para enquadramento centro da Faixa "C" do DNIT.

Peneira	Limite Inferior	
Abertura (mm)	% Retida	Quant. Mat. (g)
19,10 - 12,70	20	240
12,70 - 9,52	10	120
9,52 - 4,76	26	312
4,76 - 2,00	22	264
2,00- 0,42	14	168
0,42 - 0,177	4	48
0,177 - 0,074	2	24
0,074 - fundo	2	24
Total	100	1200

Para a caracterização do agregado foram realizados os ensaios de “Abrasão Los Angeles – A_n ” (DNER-ME 35/98), adesividade de ligantes betuminosos para agregado miúdo (DNER-ME 079/94) e para agregado graúdo (DNER-ME 078/94), e densidade aparente e real dos agregados grossos e finos por meio dos métodos ASTM C-127-01 e ASTM C-128-01. O resumo dos resultados dos ensaios de caracterização do agregado pode ser visto na Tabela 3.2.

Tabela 3.2. Resultados dos ensaios de caracterização do agregado

Propriedades	Granito
Adesividade miúda	Má
Adesividade graúda	Não Satisfatória
Abrasão Los Angeles	23%
Densidade Real	2,608
Densidade Aparente	2,593

3.2.2. Ligante Asfáltico

Nessa pesquisa foram utilizados dois tipos de ligante asfálticos, um cimento asfáltico de petróleo convencional tipo CAP 50/70, e um modificado por polímero SBS (estireno-butadieno-estireno) cuja base é o próprio CAP 50/70. Os dois tipos de ligantes foram fornecidos pela empresa Betunel, da unidade de fabricação de Ribeirão Preto, São Paulo.

Para a caracterização das Temperaturas de Usinagem e Compactação (TUC), realizou-se o ensaio de viscosidade Brookfield, normalizado pela ASTM D 4402. Para esse ensaio foi utilizado o Spindle nº 21, e os seguintes parâmetros (temperatura, rotação e taxa de cisalhamento), como mostra a Tabela 3.3, para se obter as leituras de viscosidade.

Tabela 3.3. Parâmetros para o Ensaio de Brookfield

Temperatura (°C)	Rotação (rpm)	Taxa de Cisalhamento (Seg⁻¹)
135	20	19
143	40	37
150	60	56
163	80	74
177	100	93

Como os valores da porcentagem de torque mantiveram entre 10% a 98% de acordo com a ASTM D 4402 não houve restrições em utilizar os valores descritos na Tabela 3.3, e em utilizar os resultados desse ensaio para a caracterização dos ligantes asfálticos. As curvas

de viscosidade Brookfield versus Temperatura de cada ligante asfáltico são apresentadas na Figura 3.2.

Figura 3.2. Resultados de ensaios de viscosidade em diferentes temperaturas

Observando-se essas curvas pode-se notar a variação da viscosidade em função da temperatura de cada material. Por meio desses resultados, no que se refere à deformação permanente, espera-se que a maior viscosidade apresentada pelo *CAP modificado* leve a melhores desempenhos mecânicos da mistura asfáltica, quando comparado ao *CAP convencional*.

O gráfico de viscosidade Brookfield, além de apresentar o comportamento do ligante asfáltico em função da variação de temperatura, também possibilita a determinação das temperaturas de usinagem e compactação (TUC). Essas temperaturas foram determinadas de acordo com as recomendações do Manual SUPERPAVE®, onde se recomenda que a temperatura apropriada de usinagem é aquela em que o CAP apresenta uma viscosidade de $0,17 \pm 0,02$ Pa.s, e a temperatura de compactação é aquela na qual o CAP apresenta uma viscosidade de $0,28 \pm 0,03$ Pa.s (YILDIRIM *et al.* 2006). O intervalo de temperaturas de usinagem e compactação do CAP 50/70 e do CAP 50/70 modificado com SBS podem ser visualizadas na Figura 3.3 e Figura 3.4, respectivamente. As TUC adotadas para cada tipo de

ligante asfáltico referem-se a média das faixas encontradas e são apresentadas na Figura 3.3 e Figura 3.4, e na Tabela 3.4.

Figura 3.3. TUC do CAP 50/70

Figura 3.4. TUC do CAP 50/70+SBS

Tabela 3.4 Temperaturas de aquecimento e de compactação para as misturas asfálticas

	<i>CAP 50/70</i>	<i>CAP 50/70+SBS</i>
Temperatura de aquecimento (° C)	150	180
Temperatura de compactação (° C)	140	168

3.2.3. Misturas Asfálticas

3.2.3.1. Dosagem

As misturas asfálticas dessa pesquisa são resultantes da combinação fatorial dos fatores:

- (i) aditivo (2 níveis – centro da Faixa “C” (sem cal) e centro da Faixa “C” (com cal));
- (ii) Vv (2 níveis – 4 e 7%) e
- (iii) tipo de ligante asfáltico (2 níveis – convencional e modificado com polímero SBS).

Finalizada a caracterização dos materiais para a composição da mistura asfáltica, iniciou-se o procedimento de dosagem do concreto asfáltico. Este procedimento possibilita a determinação do teor de ligante “de projeto”. Esse teor de asfalto depende de diversos parâmetros como o método de dosagem, a energia de compactação e o tipo de mistura. O método adotado para a dosagem foi uma modificação do SUPERPAVE®, uma vez que se utilizou o compactador giratório na moldagem dos corpos de prova.

A metodologia SUPERPAVE® não foi aplicada integralmente, pois as distribuições granulométricas de trabalho foram previamente selecionadas. A determinação do teor de ligante asfáltico inicial (P_{ii}) foi efetuada a partir do método da Superfície Específica (DNER M-148-60), que permite uma previsão da quantidade de ligante asfáltico necessária para que haja o cobrimento dos agregados. O valor do teor de ligante asfáltico inicial para o centro da Faixa “C” foi de 5,0%.

A determinação do “teor de projeto” foi feita a partir da compactação de três corpos de prova com o teor de ligante inicial (P_{ii}) encontrado anteriormente, além de três outros teores sendo $\pm 0,5$ e $-1,0\%$ em relação ao P_{ii} , como mostra a Tabela 3.5. Sendo uma tréplica para

cada teor de asfalto estimado, dividida da seguinte maneira: dois corpos de prova para a determinação da massa específica aparente (G_{mb}) como determina a norma ASTM D2726 – 2011 e o outro para a determinação da absorção do ligante asfáltico e a densidade máxima teórica (G_{mm}) calculada a partir dos resultados do Ensaio Rice ASTM D2041 – 2000.

Tabela 3.5. Teores estimados para ligante asfáltico

Teores de Ligante Asfáltico				
Centro Faixa C com CAP 50/70	3,50	4,00	4,50	5,00
Centro Faixa C com CAP 50/70 e Polímero	3,50	4,00	4,50	5,00

Como este estudo retrata a deformação permanente que ocorre na camada de revestimento, adotou-se uma situação onde a rodovia apresente um tráfego de *médio a alto*, onde os valores de $N_{inicial}$, $N_{projeto}$, e N_{final} são respectivamente 8, 100 e 160 (AASHTO M323, 2004). Pelo método do SUPERPAVE®, os critérios para a determinação do teor de ligante de projeto em função do tráfego *médio a alto* são: (i) $V_v = 4\%$ (para $N_{projeto} = 100$), (ii) $VAM > 13\%$ para tamanho máximo nominal (TMN) 12,7 mm, (iii) $65\% < RBV < 75\%$ (para fluxo de veículos entre 10 e 30×10^7), (iv) $G_{mm@N_{inicial}} < 89\%$, (v) $G_{mm@N_{máximo}} < 98\%$, (vi) Proporção de fíler/asfalto entre 0,6 e 1,8 (MOTTA *et al.*, 1996).

Como a dosagem das misturas asfálticas foi executada de acordo com os procedimentos de Superpave® Nível 1 Strategic Highway Research Program (SHRP), a quantidade ideal de ligante usado na mistura correspondeu a 4% de volume vazios para o número de giros de projeto igual à 100, esse que corresponde ao tráfego *médio a alto* (AASHTO M323, 2004).

Após realizar a compactação dos corpos de prova para os 4 teores de ligante asfáltico inicial (3,50, 4,00, 4,50, 5,00), esses foram submetidos a pesagens a seco, imersa e superficialmente seca para a determinação do V_v (ASTM D3203 – 94) da mistura asfáltica compactada no esforço de compactação $N_{projeto}$.

Em seguida, para determinar o “teor de projeto” de cada tipo de misturas asfáltica foi traçada uma curva $V_v \times$ teor de CAP inicial que permitiu determinar a quantidade de ligante asfáltico necessária para que a mistura apresentasse $V_v = 4\%$ para $N_{projeto} = 100$ giros, para as misturas asfálticas com CAP 50/70 foi encontrado o valor de 4,25%, e para as com CAP 50/70+SBS foi de 4,50%.

3.2.3.2. Moldagem

O processo de moldagem dos corpos de prova se iniciou com o aquecimento dos materiais utilizados na composição do concreto asfáltico. O ligante asfáltico foi colocado na estufa por um tempo de aproximadamente 2 horas para que esse se encontrasse na temperatura de usinagem. Com relação aos agregados, no momento da mistura, foram mantidos a uma temperatura de 10 a 15° C acima da temperatura do ligante asfáltico (DNIT ES 031/04).

Em um equipamento adaptado foi realizada a mistura entre o ligante asfáltico e o agregado em quantidade suficiente para a produção de vários corpos de provas simultaneamente. Em seguida o material foi separado em porções de 1.200 g e armazenado em recipientes e acondicionados em estufa não ventilada por um período de 2 horas na temperatura de compactação. Este procedimento de condicionamento antes do processo de compactação é preconizado pela AASHTO PP2.

Após o procedimento de condicionamento, os corpos de prova foram compactados por amassamento no compactador giratório IPC com o número de giros igual à 100 a fim de resultarem em um $V_v=4\%$, no entanto, para moldar os corpos de prova na condição de $V_v=7\%$, o número de giros foi 40.

3.3. ENSAIOS DE PROPRIEDADES MECÂNICAS

Os ensaios adotados nessa pesquisa para a análise das propriedades mecânicas da mistura asfáltica foram: módulo de resiliência e resistência à tração por compressão diametral, para a caracterização das misturas asfálticas, e ensaio de fluência por compressão uniaxial estática e dinâmica (*Creep* Estático e *Creep* Dinâmico), para o estudo de deformação permanente.

Os ensaios não foram realizados na sequência descrita anteriormente e com os mesmos corpos de prova. Um grupo foi submetido aos ensaios não destrutivos como o módulo de resiliência e o ensaio de fluência por compressão uniaxial estática e dinâmica. Outro grupo de corpos de prova, com as mesmas características do grupo anterior, foi submetido ao ensaio de

tração por compressão diametral onde o corpo de prova foi submetido a uma carga progressiva até o momento de sua ruptura.

Como o programa experimental possui como uma das variáveis o efeito da variação de temperatura, se fez necessário realizar os ensaios não destrutivos em duas temperaturas, na seguinte ordem 25 e 40° C, para os ensaios de módulo de resiliência, e de 40 e 50° C, para os ensaios de *creep* estático e *creep* dinâmico.

3.3.1. Módulo de Resiliência

O ensaio de módulo de resiliência foi realizado para determinar a rigidez da mistura asfáltica, e os efeitos devido à variação dos fatores modificador, aditivo, volume de vazios e temperatura nas suas propriedades.

O método de ensaio consistiu na aplicação de 100 ciclos de carregamento constante, cada ciclo tem duração de 1,0 s, e nesse 1,0 s de carregamento 0,1 s corresponde ao período de solicitação, e 0,9 s ao período de repouso como preconiza a norma da AASHTO TP31-96.

Tendo em vista manter a integridade do material, foi fixado um valor para deformação inicial nos ensaios de módulo de resiliência, de modo que a carga inicial calibrada no início de cada ensaio produzisse deslocamentos na ordem de 0,0025 a 0,0030 milímetros. Esse procedimento não é preconizado pelo método de ensaio do DNER 133/94, mas foi necessário para garantir que não houvesse nenhum tipo de dano ou ruptura no corpo de prova que pudesse alterar as propriedades dos corpos de prova.

Os ensaios foram realizados em duas temperaturas (25 e 40° C), na ordem da menor para a maior temperatura com o propósito de evitar qualquer dano aos corpos de prova, que em seguida foram submetidos aos ensaios de *creep* estático e *creep* dinâmico.

De acordo com o DNER 133/94 e pela AASHTO TP-31-96, o valor do módulo de resiliência é expresso conforme a equação 3.1.

$$MR = \frac{F}{\Delta \times h} (0,9976\mu + 0,2692) \quad (3.1)$$

Onde:

MR – Módulo de resiliência (MPa);

F – Carga vertical repetida aplicada diametralmente ao corpo de prova (N);

Δ – Deslocamento total (correspondente à deformação elástica ou resiliente sofrida pelo corpo de prova, na direção da aplicação da carga) (mm);

H – Altura do corpo de prova (mm);

μ - Coeficiente de Poisson (0,30).

Esse ensaio permite avaliar não somente o módulo de resiliência, mas também outros parâmetros incidentais chamados de recuperação retardada (RR) e atraso. A recuperação retardada (RR) refere-se à recuperação da mistura no período de repouso (FURLAN *et al.* 2006) , esse comportamento é relacionado indiretamente à viscoelasticidade do material. Com a recuperação retardada é possível verificar alterações nas respostas das misturas asfálticas. Esse parâmetro pode ser determinado pelas expressões 3.2 e 3.3:

$$RR = \frac{(MR_I - MR_T)}{MR_I} \times 100 \quad (3.2)$$

$$RR = \frac{\frac{\sigma}{\varepsilon_I} - \frac{\sigma}{\varepsilon_T}}{\frac{\sigma}{\varepsilon_I}} = \frac{\frac{\varepsilon_T - \varepsilon_I}{\varepsilon_I \varepsilon_T}}{\frac{\varepsilon_T - \varepsilon_I}{\varepsilon_T}} \times 100 \quad (3.3)$$

Onde:

RR – Recuperação retardada (%);

MR_I – Módulo instantâneo (MPa);

MR_T – Módulo total (MPa);

σ – Tensão aplicada;

ε_I – Deformação total;

ε_T – Deformação elástica instantânea.

O outro parâmetro de rigidez é o atraso, esse determinado em segundos. O atraso se refere a uma medida de defasagem entre os picos dos pulsos de carga e de deslocamento. O cálculo desse parâmetro se baseia na diferença de tempo entre ocorrências do ponto de carga máxima e o ponto de máximo deslocamento. O atraso é avaliado no período de carregamento, e pode (com a RR) estar relacionado à viscoelasticidade do material (FURLAN *et al.* 2006).

O coeficiente de Poisson adotado para os cálculos foi de 0,30. Para a determinação do módulo de resiliência (MR) e dos parâmetros de rigidez foi utilizado um programa elaborado em plataforma Labview 7.1 pelo Prof. Glauco Tulio Pessa Fabbri do Departamento de Engenharia de Transporte da Escola de Engenharia de São Carlos.

3.3.2. Fluência por Compressão Uniaxial Estática (*Creep* Estático)

O ensaio de *creep* estático consistiu na aplicação de uma carga de compressão estática e contínua sobre os corpos de prova cilíndricos, moldados pelo compactador giratório SUPERPAVE®. Os ensaios foram realizados nas condições de (i) temperatura de 40° C e 50° C, (ii) aplicação da carga estática durante um tempo de 60 minutos e 15 minutos de recuperação, (iii) e carregamento aplicados em 2 diferentes níveis de tensões (0,1 e 0,4 MPa).

Antes de iniciar o ensaio propriamente dito os corpos de prova foram submetidos a uma fase de preparação da amostra e de pré-condicionamento ao carregamento. Para a preparação da amostra, primeiramente foi realizado a lixamento de suas faces para a regularização da superfície que recebe o carregamento e o condicionamento térmico de, no mínimo, 4 horas.

Na fase de pré-condicionamento, os corpos de prova foram submetidos a uma aplicação de carga estática durante cinco minutos, seguida por um período de cinco minutos de descanso ou recuperação.

As leituras dos carregamentos e deslocamentos axiais sofridos pelos corpos de prova foram obtidas por dois medidores do tipo *linear variable differential transducers* (LVDT's). O deslocamento axial apresentado pelos corpos de prova devido ao carregamento do ensaio foi determinado pela média aritmética entre as leituras fornecidas pelos dois LVDT's.

Por meio do ensaio de *creep* estático é possível obter indicadores que permitem analisar a sensibilidade da mistura asfáltica à deformação permanente, sendo eles a deformação total média durante todo o ensaio (4500s) (D_t), expressão 3.4, módulo de fluência após o período de recuperação da mistura (4500s) (M_f), expressão 3.5 e inclinação do estágio secundário da curva de deformação *versus* tempo de carregamento (I_{curva}), expressão 3.6.

$$D_t = \frac{\Delta h_{4500}}{h_0} \quad (3.4)$$

$$M_f = \frac{\sigma}{D_t} \quad (3.5)$$

$$I_{curva} = \frac{\log \varepsilon_{3600} - \log \varepsilon_{1000}}{\log 3600 - \log 1000} \quad (3.6)$$

Onde:

D_t – Deformação total (mm/mm);

Δh_{4500} – Variação da altura do corpo de prova, após o período de recuperação (4500s);

Δh_0 – Medida inicial da altura do corpo de prova (mm);

M_f – Módulo de fluência após o período de recuperação (4500s)

σ – Nível de tensão do ensaio;

ε_{3600} – Deformação para 3600s de ensaio;

ε_{1000} – Deformação para 1000s de ensaio

O gerenciamento dos ensaios de *creep* estático foi realizado por meio do programa *Labview 7.1®*, que permite o controle da prensa pneumática, do carregamento aplicado sobre o corpo de prova medido por uma célula de carga, e o acesso à leitura dos deslocamentos axiais ocorridos durante todo o ensaio, a Figura 3.5. apresenta uma tela de um ensaio completo.

Figura 3.5. Tela do ensaio de *creep* estático

Com a aquisição e processados os dados de ensaio pelos programa *Labview 7.1®*, foi possível traçar as curvas de fluência do material e assim avaliar a estabilidade estrutural da mistura asfáltica para cada condição do programa experimental.

3.3.3. Fluência por Compressão Uniaxial Dinâmica (*Creep* Dinâmico)

O ensaio de *creep* dinâmico constitui da aplicação de pulsos de carga com duração de 1,0 s, sendo o carregamento de 0,1 s e o de recuperação de 0,9 s. Esses ensaios tiveram duração de 3600 s, precedidos por um condicionamento que consistiu de 200 ciclos de carregamento para a mesma tensão empregado no ensaio: 0,1 ou 0,4 MPa.

De forma similar ao ensaio de *creep* estático, a aquisição dos dados de tensão e deformação foi obtida por meio de dois medidores tipo LVDT, tendo sido utilizada a média aritmética entre as leituras fornecidas pelos dois LVDT's. O cálculo dos parâmetros D_b , M_f e I_{curva} , são calculados do mesmo modo como apresentado nos parâmetros do ensaio de *creep* estático.

O processo, o controle da prensa pneumática e a aquisição e o cálculo dos dados do ensaio de *creep dinâmico* foram efetuados por meio de rotinas desenvolvidas em plataforma *Labview 7.1®*. Figura 3.6 mostra a tela do programa de ensaio de *creep* dinâmico desenvolvido pelo Prof. Glauco Tulio Pessa Fabbri.

Figura 3.6. Tela do ensaio de *creep* dinâmico

3.3.4. Resistência à Tração por Compressão Diametral

Esse ensaio foi realizado de acordo com o método de ensaio do DNER-ME 138/94, com a finalidade de determinar a resistência à tração dos corpos de prova por meio do ensaio de compressão diametral.

Os corpos de prova foram submetidos a uma carga de compressão diametral estática progressiva até o momento de sua ruptura em temperatura ambiente de 25° C. A ruptura do corpo de prova é caracterizada pela separação das duas metades do corpo de prova em um plano diametral vertical.

Os ensaios para determinação da resistência à tração por compressão diametral (RT) foram realizados na temperatura de 25° C em corpos de prova em diferentes condições, a saber:

- (i) Corpos de prova virgens;
- (ii) Corpos de prova que passaram pelo ensaio de *creep* a 40° C;
- (iii) Corpos de prova que passaram pelo ensaio de *creep* a 50° C.

Os ensaios foram realizados nesses 3 grupos de corpos de prova porque se suspeitava do acúmulo de dano ou deterioração dos corpos de prova após serem submetidos aos ensaios de *creep* em diferentes níveis de tensão. Oportunamente, é discutida a influência do “histórico de tensões” na RT de misturas asfálticas.

Segundo o método de ensaio do DNER-ME 138/94, a resistência à tração é determinada pela expressão 3.7:

$$\sigma_R = \frac{2F}{\pi dh} \quad (3.7)$$

Onde:

σ_R = Resistência à tração (MPa);

F = Carga de ruptura (N)

d = Diâmetro do corpo de prova (mm);

h = Altura do corpo de prova (mm).

3.4. ANÁLISE DOS RESULTADOS

A análise dos resultados dos ensaios foi feita de forma comparativa. Cada condição experimental levou a apreciação de valores médios de dois corpos de prova e o desvio padrão de cada grupo.

Ao longo do período dos ensaios foi feito o controle de qualidade dos ensaios, adotando o desvio de grupo (desvio padrão/média x 100) como indicador da heterogeneidade do grupo e dos corpos de prova.

Foi adotado um valor para o desvio de grupo para cada ensaio mecânico realizado nesta pesquisa, ficando assim disposto:

- (i) Desvio de grupo de MR de até 6,00% para os ensaios à temperatura de 25° C e de 3,00% para 40° C;
- (ii) Desvio de grupo de RT em média de 5% ;
- (iii) Desvio de grupo de *creep* estático em média de 20%;
- (iv) Desvio de grupo de *creep* dinâmico em média de 17%.

Desta forma tentou-se evitar o confundimento pela dispersão dos resultados obtidos pelos ensaios devido à heterogeneidade dos corpos de prova do grupo e as variações e erros intrínsecos ao procedimento de ensaio.

Os ensaios não destrutivos cujos resultados produziram desvios maiores que o previsto foram repetidos. Os corpos de prova que persistiram em apresentar valores fora do desvio de grupo estipulado para cada condição foram substituídos.

CAPÍTULO

4. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

4.1. MÓDULO DE RESILIÊNCIA

Os resultados e as análises que são apresentados no decorrer deste item referem-se aos valores médios e a taxa de variação para o *módulo de resiliência e recuperação retardada* das misturas com *CAP 50/70*, *CAP 50/70+CAL*, *CAP 50/70+SBS* e *CAP 50/70+SBS+CAL*. Os valores médios dos parâmetros (MR e RR) para cada tipo de mistura e suas respectivas características volumétricas são resultados médios de 6 réplicas. Os corpos de prova foram submetidos ao ensaio de módulo de resiliência em duas temperaturas (25 e 40° C), na ordem da menor para a maior temperatura com o objetivo de amenizar algum dano que pudesse ocorrer no corpo de prova em decorrência da variação da temperatura. Como o ensaio para determinação de MR permite um maior controle foi adotada uma margem de variação de até 6% nos valores do desvio de grupo.

A Tabela 4.1 mostra os resultados de MR e RR das misturas testadas em diferentes temperaturas, nela se pode observar que a *temperatura* foi a variável que mais influenciou nos valores de MR e RR. No que se refere à rigidez, o aumento da temperatura de 25° C para 40° C resultou em reduções de MR da ordem de 70%, já com relação à RR, observou-se aumentos de até 18%.

Tabela 4.1. Valores de MR e RR das misturas asfálticas

	4%V _v				7%V _v			
	MR _{25°C}	MR _{40°C}	RR _{25°C}	RR _{40°C}	MR _{25°C}	MR _{40°C}	RR _{25°C}	RR _{40°C}
CAP 50/70	7017	2337	0.293	0.255	5765	2005	0.285	0,144
CAP 50/70+CAL	7254	2409	0.289	0.316	6190	2123	0.275	0.284
CAP 50/70+SBS	6994	2339	0.242	0.290	5816	2011	0.260	0.286
CAP 50/70+SBS+CAL	7163	2265	0.292	0.308	5922	1959	0.281	0.291

Na Figura 4.1 são apresentados os MR das misturas asfálticas testadas, nela se pode notar que a variação do *volume de vazios* também proporcionou um efeito importante, mas em menor intensidade quando comparado ao efeito da temperatura. Neste caso, a variação do *Vv* de 4% para 7% reduziu os valores de MR em até 20% para o caso das misturas testadas a 40° C.

Vale salientar que, para condições experimentais similares, todas as misturas asfálticas apresentaram valores de MR muito próximos, dificultando o entendimento dos efeitos da modificação do ligante asfáltico com o *polímero SBS* e da adição de *cal*. Assim sendo, em termos de rigidez (MR) não foi possível detectar tendências de comportamentos ou respostas particulares, podendo o efeito das variáveis estar contido na dispersão do ensaio ou do grupo (heterogeneidade dos corpos de prova).

Figura 4.1. Módulo de Resiliência das misturas asfálticas testadas

Na Figura 4.2 são apresentadas as curvas de RR *versus* temperatura, onde se pode notar que o fator *temperatura* foi também importante na resposta da Recuperação Retardada (RR). De modo geral, as misturas *sem cal* apresentaram variações consideráveis de RR com o aumento da temperatura, contudo os comportamentos foram antagônicos: a mistura com CAP 50/70 apresentou reduções de RR com o aumento da temperatura, enquanto que a mistura com CAP 50/70+SBS apresentou aumento de RR. Para a mistura com CAP 50/70, esse efeito foi mais pronunciado nas misturas com *Vv*=7%, com redução de 50% no valor da RR, e para o CAP 50/70+SBS nas misturas de *Vv*=4% com o acréscimo de 20%. A partir dos valores de RR, também foi possível concluir que a mistura com CAP 50/70 apresentou melhor capacidade de recuperação nesta faixa de temperatura.

Para todas as outras misturas asfálticas testadas a tendência observada é que a RR aumenta com o aumento da temperatura, indicando que há uma recuperação mais lenta. Esse comportamento, de certa forma, já era esperado, pois com o aumento da temperatura o ligante asfáltico se torna menos consistente e suas características viscoelásticas se destacam.

Figura 4.2. Recuperação Retardada

Ainda com relação ao fator *temperatura*, a Figura 4.3 apresenta as tendências de comportamentos de MR e RR em resposta ao aumento da temperatura de 25 para 40° C. Nela se pode notar uma relação inversa entre o MR e RR, ou seja, o aumento da temperatura reduziu o MR e, concomitantemente, aumentou a RR das misturas, exceto para a mistura com CAP 50/70 que apresentou redução de MR e de RR com o aumento da temperatura. Neste caso, o que se pode entender é que a mistura com CAP 50/70 ao se tornarem menos rígidas, com o aumento da temperatura para 40° C, apresentaram também recuperação mais rápida.

Figura 4.3. MR e RR *versus* Temperatura

No que se refere ao efeito da variação do *volume de vazios* nos valores de RR, notou-se que, com o aumento de Vv de 4 para 7%, somente houve redução de RR nas misturas com

CAP 50/70 e *CAP 50/70+CAL*, na temperatura de 40° C, sendo essas reduções de 44% e de 11%, respectivamente.

Com relação ao efeito do uso do *CAP 50/70+SBS*, de forma geral, não foi possível identificar tendências particulares de comportamento de MR e RR das misturas com esse material. De forma similar, para as misturas com *CAP 50/70+SBS+CAL*, não foi possível observar nenhum efeito no comportamento de MR e RR.

A mistura com *CAP 50/70+SBS* e $V_v=4\%$ ensaiada à 25° C apresentou o menor valor de RR quando comparado ao das demais misturas, porém quando submetida à temperatura mais elevada, de 40° C, apresentou ganho de RR em 14% e 98% para as misturas com $V_v=4\%$ e $V_v=7\%$, respectivamente. Isso indica que nas misturas com *CAP 50/70+SBS* e $V_v=4\%$ e $V_v=7\%$, o efeito do *asfalto modificado* foi perceptível e benéfico somente na condição de temperatura mais amena (25° C).

Quanto à adição de *cal* nas misturas asfálticas, não foi possível observar tendências de comportamento que destacassem seu efeito. O *efeito da cal* se destacou na mistura com *CAP 50/70* submetidas à 40° C, o qual propiciou aumento da RR de 24% e 97% para $V_v=4\%$ e $V_v=7\%$, respectivamente, e para a mistura com *CAP 50/70+SBS* com $V_v=4\%$ na temperatura de 25° C onde o acréscimo da RR foi da ordem de 20%. Assim, pode se dizer que, em geral, mesmo com a *adição de cal*, as respostas das misturas testadas foram mais lentas com o aumento da *temperatura*.

De modo geral, a partir da análise dos resultados obtidos do ensaio de módulo de resiliência é possível concluir que:

- O fator que exerce maior influência sobre os resultados de MR é a temperatura, seguido da variação do volume de vazios. Para os outros fatores, tipo de ligante asfáltico e adição da cal, não foi possível evidenciar tendências de comportamentos;
- Com relação à RR, foi possível observar o efeito dos 4 fatores (temperatura, volume de vazios, polímero SBS e uso da cal) na variação desse parâmetro. Havendo acréscimos da RR nas misturas com *CAP 50/70+SBS* com a variação da temperatura, e nas misturas com *CAP 50/70* à 40° C com uso de asfalto

modificado e adição da cal. As reduções nos valores da *RR* ocorreram somente para as misturas com *CAP 50/70* e *CAP 50/70+CAL* para ambos os *V_v* testados.

- Há uma relação entre o *MR* e *RR*, onde as misturas com valores mais baixos de *MR* apresentam maiores valores para *RR*. Essa relação é destacada em decorrência do efeito da temperatura mais elevada (40° C) e não é válida para as misturas com *CAP 50/70* (*V_v*= 4% e *V_v*=7%).

4.2. RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL

As análises descritas nesse capítulo seguem o mesmo padrão adotado no item 4.1, porém, os valores médios são apresentados para 2 réplicas. O ensaio de resistência a tração por compressão diametral foi realizado à 25° C, em corpos de prova virgens e em corpos de prova após os ensaios de *creep* dinâmico e estático. Na Tabela 4.2 e na Tabela 4.3 são apresentados os valores médios para RT das misturas testadas com *V_v*=4% e *V_v*=7%, respectivamente. As temperaturas de 40° C e 50° C apresentadas na tabela correspondem à temperatura em que os corpos de prova foram previamente submetidos nos ensaios de *creep*.

Tabela 4.2. Resultados dos ensaios de RT para as misturas com *V_v*=4%

Misturas asfálticas	<i>V_v</i> =4%		
	<i>CPs virgem</i>	<i>CPs submetidos aos ensaios de creep à 40°C</i>	<i>CPs submetidos aos ensaios de creep à 50°C</i>
CAP 50/70	1.88	1.89	1.34
CAP 50/70+CAL	1.84	1.94	1.62
CAP 50/70+SBS	2.44	2.38	2.18
CAP 50/70+SBS+CAL	2.19	2.13	2.22

Tabela 4.3. Resultados dos ensaios de RT para as misturas com *V_v*=7%

Misturas asfálticas	<i>V_v</i> =7%		
	<i>CPs virgem</i>	<i>CPs submetidos aos ensaios de creep à 40°C</i>	<i>CPs submetidos aos ensaios de creep à 50°C</i>
CAP 50/70	1.63	1.36	0.96
CAP 50/70+CAL	1.65	1.48	1.29
CAP 50/70+SBS	2.07	1.89	1.71
CAP 50/70+SBS+CAL	1.91	1.81	1.50

A Tabela 4.2, Tabela 4.3 e a Figura 4.4 mostram que os valores da RT diminuíram com o aumento do V_v da mistura, apresentando reduções da ordem de 15% para todas as misturas asfálticas virgens. Vale ressaltar que a tendência de redução da RT com aumento de V_v mudou em função da condição do CP: para os CPs que passaram pelos ensaios de *creep* à 40° C a redução da RT foi de 20% e para os CPs que passaram pelos ensaios à 50° C a redução foi de 25%. Isso mostra que as solicitações e as temperaturas empregadas nos ensaios prévios propiciaram mudanças (danos) nos CPs, tornando-os menos resistentes.

A fim de melhor visualizar os efeitos das variáveis e também da condição do CP na RT, a Figura 4.4 apresenta o gráfico que ilustra os valores da RT para cada tipo de mistura asfáltica; nela se observa que as misturas com *CAP 50/70+SBS* apresentaram maiores RT não somente na condição de CPs virgens, mas também para aqueles que foram submetidos previamente aos ensaios de *creep* dinâmico e estático à 40 e 50° C.

Foi possível notar que as misturas com *ligante modificado* apresentaram maiores valores de RT comparado às misturas com *ligante convencional*, para os corpos de prova previamente ensaiados ao *creep* à 50° C o ganho foi da ordem de 70% para as misturas *sem cal* e 27% para as *com cal*. Para a condição de *creep* à 40° C, os ganhos em relação as misturas com CAP convencional foram da ordem de 33% e 22% para as misturas *sem cal* e *com cal*, respectivamente.

Na condição virgem, as misturas com *CAP 50/70+SBS* apresentaram valores de RT 30% maiores que as misturas com *CAP 50/70*; essa maior resistência é também observada nas misturas com *CAP 50/70+SBS+CAL*, neste caso os valores de RT foram 20% maiores que as misturas com *CAP 50/70+CAL*.

Figura 4.4. Resistência a Tração por Compressão Diametral

Com relação à variação do *volume de vazios*, as *misturas virgens* apresentaram reduções de RT de 10% a 15%, e as misturas submetidas às temperaturas de ensaio de 40 e 50° C reduções de 15% a 33%. Ante esses valores é possível notar que os CPs submetidos previamente aos ensaios das temperaturas de 40 e 50° C foram os que mais sofreram influência com a variação do V_v de 4 para 7%, para as misturas com *asfalto modificado* esse efeito foi menor, à exceção da mistura com CAP 50/70+SBS+CAL à 50° C que apresentou redução da ordem de 33%.

O efeito da *adição da cal* nas misturas asfálticas nos valores de RT foi observado somente nas misturas CAP 50/70+CAL à 50 °C, resultando no aumento da RT da ordem de 21% ($V_v=4\%$) e 34% ($V_v=7\%$), em relação às misturas *sem cal* para todas as outras não houve variações importantes.

Comparando os valores de RT dos corpos de prova *virgens* e os que foram ensaiados na temperatura de 40 e 50° C foi possível identificar que os danos são maiores após serem expostos à temperatura de 50° C, principalmente nas misturas de $V_v=7\%$, pois para todos os tipos de misturas houve reduções nos valores de RT, sendo elas de

- 41% para a mistura asfáltica com CAP 50/70;
- 22% para a mistura asfáltica com CAP 50/70+CAL,
- 18% para a mistura asfáltica com CAP 50/70+SBS e;
- 22% para a mistura asfáltica com CAP 50/70+SBS+CAL.

Vale salientar que os corpos de prova com CAP 50/70 também apresentaram danos na condição de $V_v=4\%$, havendo redução de 29% no valor de RT, sinalizando que para esse tipo de mistura os danos são mais acentuados.

A Figura 4.5 mostra as curvas de Carga (kgf) *versus* Deslocamento (mm) dos ensaios de RT de todos os tipos de mistura testadas, nas condições *virgem*, 40 e 50° C. Ressalta-se que as curvas foram traçadas com os valores médios para deslocamento e carga dos CPs testados.

Por meio da análise dos resultados apresentado no decorrer desse item, foi possível concluir que:

- O uso de *asfalto modificado* contribuiu para o aumento da RT das misturas asfálticas, principalmente das misturas *sem cal* que apresentaram maiores acréscimos, da ordem de 30%, para a condição de corpos de prova *virgem*.
- A *variação do volume de vazios* de 4 para 7% resultou na redução dos valores de RT, principalmente para as misturas *com asfalto convencional*, mostrando que para as misturas com *CAP 50/70* e *CAP 50/70+CAL* as reduções nos valores da RT foram de até 28%.
- O uso da *cal* beneficiou somente as misturas com *asfalto convencional*, comportamento esse observado somente para os corpos de provas expostos à temperatura de $50^{\circ} C$.
- Quanto aos danos causados aos CPs após os ensaios de *creep* estático e dinâmico à 40 e $50^{\circ} C$, foi possível identificar que os CPs com $V_v=7\%$ submetidos aos ensaios de *creep* a $50^{\circ} C$ foram os que sofreram os maiores danos, para as misturas com o *asfalto modificado* a deterioração foi menor.

Figura 4.5. Deformação x Carga– Virgem/40° C/50° C

4.3. CREEP ESTÁTICO

No decorrer deste item é discutido o comportamento das misturas com *CAP 50/70*, *CAP 50/70+CAL*, *CAP 50/70+SBS* e *CAP 50/70+CAL+SBS* em função dos parâmetros *deformação total*, *módulo de fluência (M_f)*, *inclinação da curva (I_{curva})* e *recuperação* obtidos de ensaio de *creep* estático. A análise de cada parâmetro em função da variação dos fatores *modificador*, *aditivo (cal)*, *volume de vazios*, *temperatura* e *nível de tensão*, foi feita a partir de valores médios e das taxas de variações entre 2 réplicas, valores esses apresentados resumidamente nas tabelas 4.4 e 4.5.

Tabela 4.4. Valores médios para os parâmetros $D_t/M_f/I_{curva}/Recuperação$ – Creep Estático 0,1 MPa

Creep Estático 0.1MPa									
40°C						50°C			
Tipo de Ligante Asfáltico	Vv	Def. Total (mm/mm)	Mód. de Fluência (4500s) (MPa)	I _{curva}	Recup.(%)	Def. Total (mm/mm)	Mód. de Fluência (4500s) (MPa)	I _{curva}	Recup.(%)
CAP 50/70	4	0,00085	65,4	0,058	81,1	0,00076	85,4	0,074	81,5
CAP 50/70+CAL	4	0,00069	69,6	0,036	92,9	0,00067	258,9	0,030	84,6
CAP 50/70+SBS	4	0,00083	115,5	0,064	76,2	0,00074	131,1	0,048	85,4
CAP 50/70+SBS+CAL	4	0,00076	192,3	0,047	87,1	0,00066	524,6	0,072	99,0
CAP 50/70	7	0,00111	25,4	0,026	61,8	0,00082	56,8	0,027	84,8
CAP 50/70+CAL	7	0,00098	26,7	0,020	78,4	0,00077	123,9	0,049	80,0
CAP 50/70+SBS	7	0,00081	108,0	0,041	80,6	0,00081	68,0	0,069	77,3
CAP 50/70+SBS+CAL	7	0,00098	26,7	0,082	64,3	0,00093	160,6	0,072	74,2

Tabela 4.5. Valores médios para os parâmetros $D_t/M_f/I_{curva}/Recuperação$ – Creep Estático 0,4 MPa

Creep Estático 0.4MPa									
40°C						50°C			
Tipo de Ligante Asfáltico	Vv	Def. Total (mm/mm)	Mód. de Fluência (4500s) (MPa)	I _{curva}	Recup.(%)	Def. Total (mm/mm)	Mód. de Fluência (4500s) (MPa)	I _{curva}	Recup.(%)
CAP 50/70	4	0,00172	126,0	0,028	88,9	0,00189	127,6	0,040	78,4
CAP 50/70+CAL	4	0,00161	141,2	0,059	85,1	0,00178	79,9	0,057	100,0
CAP 50/70+SBS	4	0,00101	116,1	0,163	97,0	0,00150	104,2	0,034	74,6
CAP 50/70+SBS+CAL	4	0,00189	83,9	0,035	74,0	0,00172	83,1	0,044	72,5
CAP 50/70	7	0,00151	61,7	0,121	97,3	0,00338	23,3	0,152	50,2
CAP 50/70+CAL	7	0,00140	92,4	0,084	95,4	0,00263	39,0	0,032	62,4
CAP 50/70+SBS	7	0,00085	76,4	0,121	100,0	0,00198	67,1	0,042	70,4
CAP 50/70+SBS+CAL	7	0,00190	83,1	0,059	74,7	0,00187	143,2	0,067	82,4

Da Tabela 4.4, nota-se que para o nível tensão de *0,1 Mpa*, as misturas com *asfalto convencional sem cal* foram as que apresentaram os maiores valores para D_t e consequentemente menores valores para M_f , ao contrário do que ocorreu com as misturas com *asfalto convencional com cal* que apresentou os menores valores para D_t .

Trabalhando com o nível de tensão de *0,4 MPa*, não foi possível observar nenhuma relação entre os valores absolutos dos parâmetros apresentados (Tabela 4.5.) Com base nos

valores da Tabela 4.5, pode-se entender que este tipo de ensaio, neste nível de tensão, não permitiu observar comportamentos particulares das misturas testadas.

4.3.1. Tipo de asfalto

Neste subitem será avaliado o efeito dos dois tipos de ligantes asfálticos: convencional e modificado com *polímero SBS* nas misturas asfálticas em função dos parâmetros obtidos pelo ensaio de *creep* estático, sendo os resultados apresentados na seguinte ordem: *deformação total (D_t)*, *módulo de fluência (M_f)*, *inclinação da curva (I_{curva})* e *recuperação*. O efeito do *polímero SBS* nas misturas é feito em termos comparativos, tendo como referência as misturas com *CAP convencional*.

A Figura 4.6 apresenta o comportamento das misturas com *CAP 50/70*, *CAP 50/70+CAL*, *CAP 50/70+SBS* e *CAP 50/70+SBS+CAL* em relação à *deformação total (D_t)* obtida dos ensaios de *creep* estático realizados a *0,1 MPa* à temperatura de *40 e 50° C*. Nessa figura se pode entender que, para o *nível de tensão de 0,1 MPa* e na temperatura de *40° C*, as misturas com *Vv=4%* não exibiram variações importantes na *D_t* com o uso do *polímero SBS*, podendo-se afirmar que as *D_t* das misturas com *asfaltos convencional e modificado* foram praticamente as mesmas.

Entretanto, para as misturas com *Vv=7%*, foi possível notar que, à *40° C*, a mistura com *CAP 50/70+SBS* apresentou menor *D_t* em relação à com *asfalto convencional*; na temperatura de *50° C*, não se observou diferença expressiva do valor de *D_t* entre elas. Com relação às *misturas com cal*, notou-se que somente na condição de *50° C* as com *CAP modificado* resultaram em maiores *D_t* quando comparadas às misturas com *CAP convencional*, chegando a 20% de acréscimo de *D_t*, nas demais condições as variações não foram expressivas.

Figura 4.6. Deformação Total (%) – Creep Estático à 0,1 MPa

A Figura 4.7 apresenta os resultados de D_t de todas as misturas para os ensaios à tensão de 0,4 MPa. A partir dela é possível notar que, para o nível de tensão de 0,4 MPa, o efeito do uso do asfalto com *polímero* SBS foi mais evidente e atuou reduzindo as D_t . As misturas com CAP 50/70+SBS apresentaram reduções de D_t , da ordem de 43%, contudo, para as misturas com *polímero e cal* foram observados aumentos de D_t de até 20%, para as misturas com $V_v=4\%$, e de 35% para as misturas com $V_v=7\%$ ambas à 40°C; à exceção da mistura com $V_v=7\%$ ensaiada à 50°C cuja D_t exibiu redução de 33%. Com isso, entendeu-se que para misturas com o CAP 50/70+SBS, a *adição de cal* pode ser prejudicial à resistência de deformação, sugerindo que o uso do *asfalto modificado* juntamente com a *cal* não seja recomendável.

Figura 4.7. Deformação Total (%) – Creep Estático à 0,4 MPa

A Figura 4.8 e Figura 4.9 apresentam o comportamento das misturas asfálticas com relação ao módulo de fluência (M_f) após o período de recuperação do material ($t=4500$ s), esse parâmetro é usado tanto para classificação das misturas em determinados níveis de serviço por meio de critérios estabelecidos por Little *et al.* (1993), quanto para determinar a capacidade

da mistura asfáltica de resistir à deformação em determinado nível de tensão. Como o módulo de fluência está relacionado a um determinado nível de tensão aplicado sobre o corpo de prova com a deformação total apresentado pelo mesmo após o término do ensaio ($t=4500s$), entende-se que quanto maior o valor para o M_f maior é a capacidade dessa mistura asfáltica de resistir a deformação permanente.

A partir da análise das figuras 4.8 e 4.9, nota-se que, para o *nível de tensão de 0,1 MPa* houve ganho no valor de M_f em decorrência do uso do *ligante modificado*, com efeito mais intenso nas misturas com $V_v=4\%$, as misturas com *CAP 50/70+SBS* apresentaram acréscimos da ordem de 77% à 40° C e 53% à 50° C, e para as misturas com *CAP 50/70+SBS+CAL* o dobro de acréscimo em relação às misturas com *CAP 50/70+CAL*.

Na Figura 4.8 também consta (em linhas tracejadas) o intervalo dos valores de módulo de fluência determinado por Little *et al.*(1993), mostrando que, de acordo com seus critérios e para as condições de $V_v=4\%$ e na temperatura de 40° C, somente as misturas com *CAP 50/70* e *CAP 50/70+CAL* apresentariam um bom desempenho para o nível de tráfego de médio a alto.

Figura 4.8. Módulo de Fluência após Recuperação (kgf/cm²) de 0,1 MPa à 40° C – Creep Estático

Figura 4.9. Módulo de Fluência após Recuperação (kgf/cm²) de 0,1 MPa à 50° C – Creep Estático

Para a Figura 4.10, que apresenta as variações para o M_f nos ensaios de *creep* estático realizado à tensão de 0,4 MPa, foi possível notar que o efeito do uso de *ligante modificado com polímero SBS* refletiu nos valores de M_f da maioria das misturas em estudo, exceto para as misturas com CAP 50/70+SBS de $V_v=4\%$ à 40° C e a com CAP 50/70+SBS+CAL de $V_v=4\%$ à 50° C e de $V_v=7\%$ à 40° C, onde as variações dos valores M_f foram baixas em relação aos seus referenciais, e, por isso, uma análise poderia ser prematura ou estar contaminada pelas diversas fontes de erros experimentais.

O contrário ocorreu na condição de ensaio à 50° C, onde todas as misturas com CAP modificado e $V_v=7\%$ resultaram em acréscimos do valor de M_f , em média, de 220%.

Figura 4.10. Módulo de Fluência após Recuperação (MPa) – Creep Estático à 0,4 MPa

Analisando os gráficos apresentados na Figura 4.11, que exibem as variações dos valores da I_{curva} de cada tipo de mistura asfáltica a 0,1 MPa e a 0,4 MPa, pode-se dizer que, para o nível de tensão igual a 0,1 MPa (Figura 4.11 a), o uso do *asfalto modificado* resultou em maiores inclinações, sendo mais representativas nas misturas com $V_v=7\%$, onde a mistura

com *CAP 50/70+SBS* apresentou acréscimos de 55% no ensaio realizado à 40° C e de 150% à 50° C em relação a mistura com *CAP 50/70*, já para a mistura com *CAP 50/70+SBS+CAL* acarretou em acréscimos de 299% à 40° C e 47% à 50° C.

Para os ensaios realizados a 0,4 MPa (Figura 4.11 b) houve acréscimos da ordem de 482% para a mistura com *CAP 50/70+SBS* ($V_v=4\%$) à 40° C e de 108% para a com *CAP 50/70+SBS+CAL* ($V_v=7\%$) à 50° C. Todas as outras misturas com *asfalto modificado* apresentaram reduções nos valores da I_{curva} .

Quanto à I_{curva} , não foi observada tendência clara que sugerisse que as misturas com *asfalto modificado* são mais ou menos propensas a velocidades de deformação mais altas (indicado pela I_{curva}) que as misturas com *asfalto convencional*. No que se refere à comparação entre as misturas que tiveram *adição de cal*, observou-se que a *presença da cal* em misturas com *CAP modificado* diminuiu a I_{curva} e, por consequência, a propensão ao acúmulo de deformação.

Figura 4.11. I_{curva} – Creep Estático à 0,1 MPa e 0,4 MPa

Esperava-se que a capacidade de recuperação após o carregamento fosse maior nas misturas com *asfalto modificado*, porém para o nível de tensão igual à 0,1 MPa, como pode

ser visto na Figura 4.12, onde se apresenta as curvas de Deformação (mm/mm) x Tempo(s), a melhora na recuperação ocorreu somente para as misturas *CAP 50/70+SBS* de $V_v=7\%$ e *CAP 50/70+SBS+CAL* de $V_v=4\%$, com acréscimos de 30% à 40° C e 17% à 50° C, respectivamente.

Contudo, deve ser destacado nesta análise que a execução do ensaio em baixa tensão (0,1 MPa) torna a interpretação dos ensaios difícil, uma vez que nenhum dos parâmetros analisados parece ter se mostrado sensível às mudanças dos níveis das variáveis. O efeito da mudança da temperatura, que é fator de efeito mais pronunciado sobre as variáveis, destaca algumas respostas particulares das misturas asfálticas, porém com baixa intensidade.

Figura 4.12. Curva de Deformação(mm/mm) x Tempo(s) – Creep Estático à 0,1 MPa

A Figura 4.13 apresenta as curvas de deslocamento *versus* tempo dos ensaios realizados à tensão de 0,4 MPa. Nela se pode entender que aumentando o nível de tensão, as misturas com *asfalto modificado* e $V_v=7\%$, ensaiadas à temperatura de 50° C, apresentaram maiores recuperações, tendo sido esse acréscimo de 40% quando comparado ao da mistura com *CAP 50/70*, e para a com *CAP 50/70+SBS+CAL* de 32% em relação a mistura com

CAP 50/70+CAL., A *adição de cal* foi considerada prejudicial para a recuperação das misturas com *asfalto modificado* na temperatura de 40°C , porque essas misturas apresentaram reduções de, aproximadamente, 25% em relação às misturas de referência.

Figura 4.13. Curva de Deformação (mm/mm) x Tempo (s) – *Creep* Estático à 0,4 MPa

4.3.2. Adição da cal

Neste subitem os parâmetros do ensaio de *creep estático* são apresentados na ordem: D_b , M_f , I_{curva} e *recuperação*; sendo os resultados apresentados e analisados a partir da apreciação das taxas de variações e de gráficos.

As taxas de variações apresentadas no decorrer desse capítulo permitem observar o efeito das variáveis nos valores dos parâmetros dos ensaios, são representadas a partir da razão entre os parâmetros das diferentes misturas testadas e os da mistura asfáltica de referência. Taxas maiores que 1 expressam acréscimos nos valores das propriedades da mistura avaliada comparada às propriedades da mistura de referência, e taxas menores que 1, reduções dessas propriedades.

Como nesse subitem avalia-se o efeito da *adição de cal*, as misturas asfálticas de referência são: (a) mistura com *asfalto convencional* (CAP 50/70) e (b) mistura com *asfalto modificado com polímero SBS* (CAP 50/70+SBS). Desta maneira tentou-se destacar o efeito da *adição de cal* quando combinada aos diferentes tipos de asfalto.

Analisando os valores médios e as taxas de variação para *deformação total* das misturas asfálticas apresentadas pela Tabela 4.6, Figura 4.14 e Figura 4.15, foi possível concluir que a *adição da cal* reduziu a *deformação total* das misturas com CAP 50/70, para o nível de tensão igual $0,1\text{ MPa}$, este efeito se destacou somente nos ensaios realizados à 40°C , com reduções de 19% para $V_v=4\%$ e 14% para $V_v=7\%$, e, para o nível de tensão igual $0,4\text{ MPa}$ e temperatura de 50°C , somente para $V_v=7\%$ com 22% de redução.

Entretanto, para as misturas com CAP 50/70+SBS com *adição da cal* as *deformações totais* foram maiores, esse comportamento ficou claro somente nos ensaios realizados a $0,4\text{ MPa}$, pois para os ensaios realizados a $0,1\text{ MPa}$ apenas a mistura com $V_v=7\%$ apresentou aumento na *deformação total*, para a mistura de $V_v=4\%$ o valor manteve-se o mesmo.

Mais uma vez é importante lembrar que ensaios realizados em baixa tensão ($0,1\text{ MPa}$), podem não ser capazes de aquilatar o efeito das mudanças das variáveis. Se fosse considerada uma hierarquia da importância das variáveis em função da intensidade de seus efeitos, é provável que se observasse que quanto menos intenso é o efeito de dada variável, menos sensível pode ser determinado parâmetro à mudança da condição experimental. Isso, de certa forma, pode ajudar a entender que o *nível de tensão de $0,1\text{ MPa}$* pode não ser o ideal na detecção de algum comportamento particular do efeito da *adição da cal* nas misturas com relação a *deformação total*.

Tabela 4.6. Valores médios e taxas para *Deformação Total* – Efeito da *adição da cal*

				Creep Estático 0.1 MPa		Creep Estático 0.4 MPa	
	T(°C)	Fatores		D _t (mm/mm)	Taxas	D _t (mm/mm)	Taxas
		V _v (%)	CAL				
CAP 50/70	40	4	SEM	0,00085	0,81	0,00172	0,94
			COM	0,00069		0,00161	
		7	SEM	0,00111	0,86	0,00151	0,93
			COM	0,00095		0,00140	
	50	4	SEM	0,00076	0,88	0,00189	0,94
			COM	0,00067		0,00178	
CAP 50/70+SBS	40	4	SEM	0,00083	0,92	0,00101	1,87
			COM	0,00076		0,00189	
		7	SEM	0,00081	1,22	0,00085	2,24
			COM	0,00098		0,00190	
	50	4	SEM	0,00074	0,89	0,00150	1,15
			COM	0,00066		0,00172	
		7	SEM	0,00081	1,16	0,00198	0,95
			COM	0,00093		0,00187

Figura 4.14. D_t (Variável “adição da cal”) – Creep Estático à 0,1 MPa Figura 4.15. D_t (Variável “adição da cal”) – Creep Estático à 0,4 MPa

A Tabela 4.6 mostra os valores médios e as taxas de variação dos M_f de todos os tipos de misturas asfálticas testadas em diferentes condições de tensão e temperatura. Para os valores médios e taxas de variações para os M_f apresentados pela Tabela 4.7, é possível observar que houve menores deformações para as misturas com CAP 50/70+CAL e,

consequentemente, maiores valores para M_f . Este efeito se destacou principalmente nos ensaios realizados à tensão de $0,1 \text{ MPa}$ à 50° C , onde as misturas de $V_v=4\%$ apresentaram acréscimos para o M_f da ordem de 203%, e para as de $V_v=7\%$ de 118%, as demais variações podem ser visualizada na Tabela 4.7.

Tabela 4.7. Valores médios e taxas de variação para *Módulo de Fluência* – Efeito da *adição da cal*

				Creep Estático $0,1 \text{ MPa}$		Creep Estático $0,4 \text{ MPa}$	
	$T(^{\circ}\text{C})$	Fatores		$M_f(\text{MPa})$	Taxas	$M_f(\text{MPa})$	Taxas
		$V_v (\%)$	CAL				
CAP 50/70	40	4	SEM	65,4	1,06	126,0	1,12
			COM	69,6		141,2	
		7	SEM	25,4	1,05	61,7	1,50
			COM	26,7		92,4	
	50	4	SEM	85,4	3,03	127,6	0,63
			COM	258,9		79,9	
CAP 50/70+SBS	40	4	SEM	115,5	1,66	116,1	0,72
			COM	192,3		83,9	
		7	SEM	108,0	0,25	76,4	1,09
			COM	26,7		83,1	
	50	4	SEM	131,1	4,00	104,2	0,80
			COM	524,6		83,1	
		7	SEM	68,0	2,36	67,1	2,13
			COM	160,6		143,2	

Para as misturas com CAP 50/70+SBS+CAL, foi observado uma controvérsia entre os valores encontrado para M_f , pois para o mesmo tipo de mistura com $V_v=4\%$ o comportamento foi antagônico diante aos valores de M_f , apresentando acréscimos para M_f quando ensaiadas à tensão de $0,1 \text{ MPa}$ e reduções à tensão de $0,4 \text{ MPa}$, comportamento esse retratado na Tabela 4.7. Para esse tipo de mistura as maiores variações ocorreram no nível de tensão de $0,1 \text{ MPa}$ à 50° C , com acréscimos de 300% para mistura com $V_v=4\%$ e de 136% para $V_v=7\%$. Assim, nas misturas com *asfalto modificado* não foi possível observar uma tendência clara de comportamento das misturas em resposta à *adição de cal*.

A Tabela 4.8 apresenta os valores médios e as taxas de variação da I_{curva} , para todas as condições que as misturas foram testadas. A I_{curva} reflete a velocidade que a mistura asfáltica se deforma, assim, inclinações maiores indicam maiores velocidades de deformação e eventualmente maiores deformações totais.

Por meio da análise dos valores apresentados na Tabela 4.8 foi possível notar que a *adição de cal* em misturas com CAP convencional reduziu a velocidade de fluência, em outras palavras, há menor propensão à deformação permanente, esse comportamento pode ser visto

na Figura 4.16. Porém, essa condição só é válida para *baixo nível de tensão*, caso esse em que a mistura com CAP 50/70 apresentou reduções nos valores da I_{curva} em consequência da *adição da cal*, sendo em maior proporção para $V_v=4\%$ à $50^\circ C$ com redução de 59%, a exceção da mistura de $V_v=7\%$ submetida à $50^\circ C$ que apresentou aumento da I_{curva} em 79%, como mostra a Tabela 4.8.

Trabalhando com um *nível de tensão maior*, a mistura com CAP 50/70+CAL de $V_v=4\%$ apresentou maiores valores para I_{curva} quando comparada a mistura com CAP 50/70, sendo de 110% quando submetida ao ensaio de $40^\circ C$ e de 41% à $50^\circ C$. O contrário ocorreu com as misturas de $V_v=7\%$, que apresentaram reduções de 31% à $40^\circ C$ e 79% à $50^\circ C$.

De forma similar ao que se constatou anteriormente ao *efeito da cal* sobre outros parâmetros de ensaio, no que se refere à I_{curva} , poucas conclusões puderam ser extraídas da análise do comportamento das misturas testadas a *baixas tensões*, porque, aparentemente, a intensidade do efeito da variável é pequena.

Para as misturas com CAP 50/70+SBS foi observada outra tendência, de que o *aditivo cal* nesse tipo mistura acarreta em aumento dos valores para I_{curva} na temperatura de $50^\circ C$, e reduções à $40^\circ C$. Esse comportamento pode ser justificado devido ao aumento da temperatura e a diminuição da rigidez do material, sendo natural que haja o aumento da velocidade de deformação, refletindo assim nos valores da I_{curva} . Esse comportamento se enquadra a todas as condições das misturas com CAP 50/70+SBS após a *adição da cal*, exceto para a mistura com $V_v=7\%$ à $40^\circ C$ que apresentou aumento de I_{curva} de 101%. Para as demais condições, as maiores variações ocorreram para o nível de tensão de $0,4 MPa$, sendo a mistura de $V_v=7\%$ à $50^\circ C$ com acréscimo de 60% de I_{curva} , e redução de 78% para mistura de $V_v=4\%$ à $40^\circ C$.

Tabela 4.8. Valores médios e taxas de variação para I_{curva} – Efeito da adição da cal

				Variação para I_{curva}		Efeito da adição de SBS	
				Creep Estático 0.1 MPa		Creep Estático 0.4 MPa	
Fatores				I_{curva}	Taxas	I_{curva}	Taxas
$T(^{\circ}C)$ V_V (%) CAL							
CAP 50/70	40	4	SEM	0,058	0,62	0,028	2,10
			COM	0,036		0,059	
		7	SEM	0,026	0,78	0,121	0,69
			COM	0,020		0,084	
	50	4	SEM	0,074	0,41	0,040	1,41
			COM	0,030		0,057	
	7	SEM	0,027	1,79	0,152	0,21	
		COM	0,049		0,032		
CAP 50/70+SBS	40	4	SEM	0,064	0,74	0,163	0,22
			COM	0,047		0,035	
		7	SEM	0,041	2,01	0,121	0,49
			COM	0,082		0,059	
	50	4	SEM	0,048	1,49	0,034	1,31
			COM	0,072		0,044	
	7	SEM	0,069	1,05	0,042	1,60	
		COM	0,072		0,067

Figura 4.16. I_{curva} (Variável “adição da cal”) – Creep Estático à 0,1 MPa

A Tabela 4.9 apresenta os valores médios e as taxas de variação da *recuperação* de todas as misturas testadas em diferentes condições de tensão e temperatura, onde se constata que a *adição de cal* nas misturas com CAP 50/70 proporcionou acréscimos na *recuperação* para os dois níveis de tensão de ensaio e para os dois V_v , só não houve alterações para o nível de tensão de 0,1 MPa à 50° C e 0,4 MPa à 40° C. Foi possível concluir que, neste caso, a cal além de enrijecer a mistura asfáltica, também proporcionou melhora na capacidade de recuperação da mistura asfáltica, apresentando acréscimos da ordem de 24%.

Com relação às misturas com *asfalto modificado*, quando submetidas ao carregamento de 0,1 MPa, a *adição da cal* promoveu ganho de aproximadamente 15% na parcela de *recuperação* das misturas com $V_v=4\%$, mas perda de 20% para as misturas de $V_v=7\%$. Com o aumento do nível de tensão foi possível constatar o efeito da cal no enrijecimento da mistura, em ambos V_v (4 e 7%) testados as misturas apresentaram reduções na *recuperação*

com *adição da cal*. Porém, só foi possível notar este tipo de comportamento nos ensaios realizados à $40^{\circ}C$, condição em que houve redução da ordem de 25% sobre a parcela de recuperação das misturas com *CAP 50/70+SBS* em decorrência da *adição de cal*. Para os ensaios à $50^{\circ}C$ não houve variações significativas com relação a *recuperação*.

Tabela 4.9. Valores médios e taxas de variação para Recuperação – Efeito da *adição da cal*

			Creep Estático 0.1 MPa		Creep Estático 0.4 MPa	
	T(°C)	Fatores Vv (%) CAL	Recuperação (%)	Taxas	Recuperação (%)	Taxas
CAP 50/70	40	4 SEM	81,1	1,15	88,9	0,96
		COM	92,9		85,1	
	50	7 SEM	61,8	1,27	97,3	0,98
		COM	78,4		95,4	
		4 SEM	81,5	1,04	78,4	1,28
		COM	84,6		100,0	
CAP 50/70+SBS	40	7 SEM	84,8	0,94	50,2	1,24
		COM	80,0		62,4	
	50	4 SEM	76,2	1,14	97,0	0,76
		COM	87,1		74,0	
		7 SEM	80,6	0,80	100,0	0,75
		COM	64,3		74,7	
	40	4 SEM	85,4	1,16	74,6	0,97
		COM	99,0		72,5	
	50	7 SEM	77,3	0,96	70,4	1,17
		COM	74,2		82,4	

4.3.3. Variação do volume de vazios

Por meio dos dados apresentados na Tabela 4.10, onde se apresenta os valores médios para D_t e as taxas de variação para cada tipo mistura em decorrência da variação do volume de vazios (4% $\rightarrow$ 7%), foi possível notar que na condição de tensão de $0,1 MPa$ à $40^{\circ}C$, as misturas com *CAP 50/70* e *CAP 50/70+CAL* apresentaram aumento nos valores da D_t de 30 e 39%, respectivamente. Na temperatura de $50^{\circ}C$ as variações não foram significativas para esses dois tipos de misturas.

Para as misturas com *asfalto modificado*, somente a mistura *com cal* apresentou maiores valores para D_t com a variação do volume de vazios, sendo de 29% à $40^{\circ}C$ e 41% à $50^{\circ}C$; para as misturas *sem cal* as variações foram tão pequenas que se enquadram na taxa de variação atribuída a heterogeneidade do CPs ou problemas ocorridos durante o ensaio.

Tabela 4.10. Valores médios e taxas de variação para *Deformação Total* – Efeito da Variação do V_v

	$T(^{\circ}C)$	Fatores		Creep Estático 0.1 MPa		Creep Estático 0.4 MPa	
		CAL	V_v (%)	D_t (mm/mm)	Taxas	D_t (mm/mm)	Taxas
CAP 50/70	40	SEM	4	0,00085	1,30	0,00172	0,88
			7	0,00111		0,00151	
		COM	4	0,00069	1,39	0,00161	0,87
			7	0,00095		0,00140	
	50	SEM	4	0,00076	1,08	0,00189	1,79
			7	0,00082		0,00338	
CAP 50/70+SBS	40	SEM	4	0,00083	0,98	0,00101	0,84
			7	0,00081		0,00085	
		COM	4	0,00076	1,29	0,00189	1,01
			7	0,00098		0,00190	
	50	SEM	4	0,00074	1,09	0,00150	1,32
			7	0,00081		0,00198	
		COM	4	0,00066	1,41	0,00172	1,09
			7	0,00093		0,00187	

Trabalhando com carregamento de $0,4\text{ MPa}$, foi possível observar como a variação da propriedade volumétrica (V_v) pôde afetar no acúmulo de deformação nas misturas asfálticas. O efeito do aumento do *volume de vazios* foi mais pronunciado nas misturas com *asfalto convencional* nos ensaio à 50°C , chegando a apresentar acréscimos da ordem de 79% para a mistura com CAP 50/70 e 47% para a com CAP 50/70+CAL. Para a condição de $0,4\text{ MPa}$ de tensão, as misturas com *asfalto modificado* não demonstraram nenhuma variação significativa, à exceção da mistura com CAP 50/70+SBS à 50°C , que apresentou acréscimo da ordem de 32% para os valores da D_t .

A partir da Figura 4.17, que apresenta a D_t de todas as misturas testadas nas diferentes condições, nota-se que na condição de temperatura de 50°C , todas as misturas apresentaram maiores valores para D_t para o V_v de 7%. Desta forma, pode-se dizer que o aumento de D_t foi decorrente do aumento do V_v de 4 para 7%.

Figura 4.17. D_t (Variável “volume de vazios”) – Creep Estático 0,1 e 0,4 MPa

A Tabela 4.11 apresenta um resumo dos valores de M_f de todas as misturas testadas nas diferentes condições de ensaio. Os valores de M_f dos 4 tipos de mistura, nos dois níveis de tensão e de temperatura apresentaram um mesmo comportamento: a redução nos valores de M_f com o aumento do volume de vazios de 4 para 7%. Sabendo que para as misturas com baixo valor para M_f a tendência é de apresentarem maiores deformações, é possível concluir que a variação do volume de vazios imprima esse comportamento às misturas testadas com relação à deformação permanente, mesmo não tendo sido possível observar claramente essa influência a partir da análise dos valores de D_t .

Tabela 4.11. Valores médios e taxas de variação para *Módulo de Fluência* – Efeito da Variação do V_v

				Creep Estático 0.1 MPa		Creep Estático 0.4 MPa	
	T(°C)	Fatores		M_f (MPa)	Taxas	M_f (MPa)	Taxas
		CAL	V_v (%)				
CAP 50/70	40	SEM	4	65,4	0,39	126,0	0,49
			7	25,4		61,7	
		COM	4	69,6	0,38	141,2	0,65
			7	26,7		92,4	
	50	SEM	4	85,4	0,67	127,6	0,18
			7	56,8		23,3	
CAP 50/70+SBS	40	SEM	4	115,5	0,93	116,1	0,66
			7	108,0		76,4	
		COM	4	192,3	0,14	83,9	0,99
			7	26,7		83,1	
	50	SEM	4	131,1	0,52	104,2	0,64
			7	68,0		67,1	
		COM	4	524,6	0,31	83,1	1,72
			7	160,6		143,2	

É possível notar tanto pela Tabela 4.11 quanto pela Figura 4.18, que para o nível de tensão de 0,1 MPa e temperatura de 40°C, as misturas com CAP 50/70 e com CAP 50/70+CAL apresentaram taxas de variações próximas, havendo reduções dos valores de

M_f , em média, de 62%. Na temperatura de 50° C, o aumento do Vv de 4 para 7% diminuiu em 32% o M_f da mistura com CAP 50/70 e 52% da mistura com CAP 50/70+CAL.

Para as misturas com *asfalto modificado*, a mistura que mais sofreu os efeitos da variação do volume de vazios foi a *com cal*, que exibiu reduções da ordem de 86% à 40° C e 69% à 50° C. Notou-se também que esse tipo de mistura foi a que apresentou maiores variações dos valores de M_f para as duas temperaturas (40 e 50° C) na *tensão de 0,1 MPa*.

Para o carregamento de 0,4 MPa, observando-se os quatro tipos de mistura foi possível concluir que a mistura com CAP 50/70 foi a que apresentou maiores taxas de variações para o M_f em decorrência da variação do Vv, com reduções de 51% à 40° C e 82% à 50° C, e a mistura que manteve o mesmo valor para M_f foi a com CAP 50/70+SBS+CAL à 40° C, à exceção da condição de ensaio à 50° C, que apresentou acréscimos de 40% no valor do M_f , não sendo esse um comportamento em comum entre os demais tipos de misturas, como pode ser visto na Figura 4.18.

Figura 4.18. M_f (Variável “volume de vazios”) – Creep Estático 0,1 e 0,4 MPa

De modo geral, pode-se entender a importância do tipo de *ligante asfáltico* e da *cal* no aumento da rigidez das misturas, em especial, no que se refere à variação de V_v de 4 para 7%, uma vez que as misturas com *asfalto modificado* apresentaram vantagens em relação às misturas com *asfalto convencional*, em função da maior viscosidade do asfalto quando modificado com o *polímero SBS* em combinação com algum aumento da rigidez do mástique devido à *adição de cal*.

Observando os valores de I_{curva} , das misturas testadas nas diversas condições de ensaio, mostrados na Tabela 4.12 e na Figura 4.19, nota-se que para a tensão de $0,1 \text{ MPa}$, não foi possível observar tendência clara de comportamento, porém, para tensão de $0,4 \text{ MPa}$, as variações dos valores para I_{curva} mostraram que para as misturas asfálticas V_v de 7% a tendência é de maiores velocidades de deformação quando comparado as misturas de $V_v=4\%$, à exceção das misturas asfálticas com $CAP 50/70+CAL$ à 50°C e $CAP 50/70+SBS$ à 40°C que apresentaram reduções nos valores da I_{curva} , da ordem de 44% e 26%, respectivamente.

Tabela 4.12. Valores médios e taxas de variação para I_{curva} – Efeito da Variação do V_v

				Creep Estático 0.1 MPa		Creep Estático 0.4 MPa	
	T(°C)	Fatores		I_{curva}	Taxas	I_{curva}	Taxas
		CAL	V_v (%)				
CAP 50/70	40	SEM	4	0,058	0,46	0,028	4,33
			7	0,026		0,121	
		COM	4	0,036	0,58	0,059	1,43
			7	0,020		0,084	
	50	SEM	4	0,074	0,37	0,040	3,79
			7	0,027		0,152	
		COM	4	0,030	1,64	0,057	0,56
			7	0,049		0,032	
CAP 50/70+SBS	40	SEM	4	0,064	0,64	0,163	0,74
			7	0,041		0,121	
		COM	4	0,047	1,73	0,035	1,67
			7	0,082		0,059	
	50	SEM	4	0,048	1,43	0,034	1,23
			7	0,069		0,042	
		COM	4	0,072	1,01	0,044	1,50
			7	0,072		0,067

Figura 4.19. I_{curva} (Variável “volume de vazios”) – Creep Estático 0,1 e 0,4 MPa

Os valores apresentados na Tabela 4.13 para porcentagem de *recuperação* das misturas asfálticas, permitiram observar, para o nível de tensão igual à $0,1 \text{ MPa}$, que o efeito da variação da porcentagem do V_v na *recuperação* das misturas foi menos intenso para as misturas com $\text{CAP } 50/70+\text{SBS}$ nas *duas temperaturas* e para a mistura com $\text{CAP } 50/70$ e com $\text{CAP } 50/70+\text{CAL}$, ambas à 50° C . Para as demais condições e tipos de misturas houve reduções na capacidade de *recuperação*, sendo de 24% para a mistura com $\text{CAP } 50/70$ à 40° C , de 16% para $\text{CAP } 50/70+\text{CAL}$ à 40° C , e de 25% para a com $\text{CAP } 50/70+\text{SBS}+\text{CAL}$ nas *duas temperaturas* de ensaio.

Trabalhando com o nível de tensão maior ($0,4 \text{ MPa}$), foi possível observar variações importantes na *recuperação* das misturas com $\text{CAP } 50/70$ e $\text{CAP } 50/70+\text{CAL}$, ambas à 50° C , com reduções da ordem de 37%. Para as demais condições, as variações foram pequenas podendo estar contidas em desvios devido à heterogeneidade dos CPs ou a problemas de ensaio.

Tabela 4.13. Valores médios e taxas de variação para *Recuperação* – Efeito da Variação do V_v

				Creep Estático $0,1 \text{ MPa}$		Creep Estático $0,4 \text{ MPa}$	
	$T(^{\circ}\text{C})$	Fatores		Recuperação (%)	Taxas	Recuperação (%)	Taxas
		CAL	V_v (%)				
CAP 50/70	40	SEM	4	81,14	0,76	88,94	1,09
			7	61,78		97,30	
		COM	4	92,93	0,84	85,11	1,12
			7	78,42		95,41	
	50	SEM	4	81,54	1,04	78,43	0,64
			7	84,78		50,22	
		COM	4	84,57	0,95	100,00	0,62
			7	80,04		62,36	
CAP 50/70+SBS	40	SEM	4	76,22	1,06	97,04	1,03
			7	80,61		100,00	
		COM	4	87,10	0,74	73,99	1,01
			7	64,32		74,66	
	50	SEM	4	85,42	0,90	74,59	0,94
			7	77,27		70,43	
		COM	4	98,98	0,75	72,51	1,14
			7	74,21		82,41	

4.3.4. Variação da temperatura

Analisando os valores apresentados na Tabela 4.14 e o comportamento das misturas asfálticas ilustradas na Figura 4.20 e Figura 4.21, observou-se que para o nível de tensão igual a $0,1 \text{ MPa}$, somente as misturas com $\text{CAP } 50/70$ e $\text{CAP } 50/70+\text{CAL}$ com $V_v=7\%$ apresentaram reduções nos valores da D_t com a variação da temperatura de 40° C para 50° C ,

para a mistura com *CAP 50/70+CAL* a redução foi da ordem de 20%, e para mistura com *CAP 50/70* de 26%. Esse tipo de comportamento apresentado pela mistura com *CAP 50/70* com $V_v=7\%$ e para os outros tipos de misturas que não apresentaram variações significativas, deve-se ao fato do *baixo nível de tensão* do ensaio, não permitindo que o efeito da *temperatura* fosse ressaltado.

Para tensão igual à $0,4 \text{ MPa}$, a variação nos valores da D_t em função da *temperatura* só pôde ser notado nas misturas com *CAP 50/70* ($V_v=7\%$), *CAP 50/70+CAL* ($V_v=7\%$) e *CAP 50/70+SBS* ($V_v=4\%$ e $V_v=7\%$). Para todas elas houve acréscimo no valor da D_t com o aumento da *temperatura*, sendo de 124%, 87%, 48% e 32%, respectivamente. Para os demais tipos de mistura como *CAP 50/70+SBS+CAL* ($V_v=4\%$ e $V_v=7\%$) e com *CAP 50/70* ($V_v=4\%$) a variação entre os valores de D_t foram menores, mostrando que o ensaio de *creep* estático não permitiu observar tendências claras de comportamento.

Tabela 4.14. Valores médios e taxas de variação para *Deformação Total* – Efeito da Variação da *Temperatura*

	V_v (%)	Fatores CAL	$T(^{\circ}\text{C})$	Creep Estático 0.1 MPa		Creep Estático 0.4 MPa	
				D_t (mm/mm)	Taxas	D_t (mm/mm)	Taxas
CAP 50/70	4	SEM	40	0,00085	0,89	0,00172	1,10
			50	0,00076		0,00189	
		COM	40	0,00069	0,97	0,00161	1,11
			50	0,00067		0,00178	
	7	SEM	40	0,00111	0,74	0,00151	2,24
			50	0,00082		0,00338	
		COM	40	0,00095	0,81	0,00140	1,87
			50	0,00077		0,00263	
CAP 50/70+SBS	4	SEM	40	0,00083	0,90	0,00101	1,48
			50	0,00074		0,00150	
		COM	40	0,00076	0,87	0,00189	0,91
			50	0,00066		0,00172	
	7	SEM	40	0,00081	1,00	0,00085	2,32
			50	0,00081		0,00198	
		COM	40	0,00098	0,95	0,00190	0,98
			50	0,00093		0,00187

Figura 4.20. D_t (Variável “temperatura”) – Creep Estático 0,1 MPa

Figura 4.21. D_t (Variável “temperatura”) – Creep Estático 0,4 MPa

Com relação aos valores de M_f apresentados na Tabela 4.15 e pela Figura 4.22, nota-se que para o nível de tensão de 0,1 MPa todas as misturas asfálticas apresentaram acréscimo nos valores de M_f com o aumento da temperatura, em outras palavras, redução de deformações com o aumento da temperatura, embora controverso esse comportamento pode ser explicado pelo *baixo nível de tensão*, pelo *tipo de carregamento* do ensaio e pela utilização de grupo de corpos de prova diferentes, não permitindo ressaltar os efeitos da variação de temperatura nas misturas asfálticas ensaiadas.

Para as misturas *com cal* esse acréscimo foi mais significativo, da ordem de 272% e 363% para as misturas com CAP 50/70+CAL de $V_v=4\%$ e $V_v=7\%$, e de 173% e 501% para as misturas com CAP 50/70+SBS+CAL de $V_v=4\%$ e $V_v=7\%$, respectivamente. À exceção da mistura com CAP 50/70+SBS de $V_v=7\%$ que apresentou redução do M_f em 37%.

Tabela 4.15. Valores médios e taxas de variação para *Módulo de Fluência*– Efeito da Variação da Temperatura

	Vv (%)	Fatores CAL	T(°C)	Creep Estático 0,1 MPa		Creep Estático 0,4 MPa	
				M_f (MPa)	Taxas	M_f (MPa)	Taxas
CAP 50/70	4	SEM	40	65,4	1,30	126,0	1,01
			50	85,4		127,6	
		COM	40	69,6	3,72	141,2	0,57
			50	258,9		79,9	
	7	SEM	40	25,4	2,24	61,7	0,38
			50	56,8		23,3	
CAP 50/70+SBS	4	SEM	40	115,5	1,13	116,1	0,90
			50	131,1		104,2	
		COM	40	192,3	2,73	83,9	0,99
			50	524,6		83,1	
	7	SEM	40	108,0	0,63	76,4	0,88
			50	68,0		67,1	
		COM	40	26,7	6,01	83,1	1,72
			50	160,6		143,2

Figura 4.22. M_f (Variável “temperatura”) – Creep Estático 0,1 MPa

Para os valores de M_f referente ao ensaio realizado à tensão igual à 0,4 MPa apresentados na Figura 4.23 foi possível observar variação nos valores de M_f para as misturas asfálticas com CAP 50/70, CAP 50/70+SBS e com CAP 50/70+SBS+CAL de $V_v=4\%$, para as demais mistura como a com CAP 50/70 e $V_v=7\%$, e com CAP 50/70+CAL e $V_v=4\%$ e $V_v=7\%$ apresentaram reduções nos valores de M_f da ordem de 62%, 43% e 58%, respectivamente. Já para a mistura com CAP 50/70+SBS+CAL ($V_v=7\%$) houve acréscimo do M_f em 72%. Mostrando que para análise do parâmetro M_f com a variação da temperatura, é possível observar tendências mais claras à tensão de 0,4 MPa.

Figura 4.23. M_f (Variável “temperatura”) – Creep Estático 0,4 MPa

Por meio das taxas de variação da I_{curva} apresentadas na Tabela 4.16, pode-se dizer que para nível de tensão igual à 0,1 MPa, as misturas com CAP 50/70 e CAP 50/70+SBS+CAL e $V_v=4\%$ apresentaram maiores propensões a deformação permanente com o aumento da temperatura, resultando em acréscimos nos valores da I_{curva} de 29% e 51%, respectivamente. Para as misturas com CAP 50/70+CAL e CAP 50/70+SBS essa propensão refletiu somente para a condição de $V_v=7\%$, com acréscimos sobre os valores da I_{curva} de 140% e 69%, respectivamente. Para as demais condições não houve alterações importantes, exceto a mistura com CAP 50/70+SBS com $V_v=4\%$, sendo essa a única que apresentou redução para o valor da I_{curva} com a variação da temperatura, da ordem de 25%, o que pode ser efeito particular do *asfalto modificado* em elevadas temperaturas.

Tabela 4.16. Valores médios e taxas de variação para I_{curva} – Efeito da Variação da Temperatura

				Creep Estático 0.1 MPa		Creep Estático 0.4 MPa	
	Vv (%)	Fatores		I_{curva}	Taxas	I_{curva}	Taxas
		CAL	T(°C)				
CAP 50/70	4	SEM	40	0,058	1,29	0,028	1,43
			50	0,074		0,040	
		COM	40	0,036	0,84	0,059	0,96
			50	0,030		0,057	
	7	SEM	40	0,026	1,04	0,121	1,25
			50	0,027		0,152	
CAP 50/70+SBS	4	SEM	40	0,064	0,75	0,163	0,21
			50	0,048		0,034	
		COM	40	0,047	1,51	0,035	1,26
			50	0,072		0,044	
	7	SEM	40	0,041	1,69	0,121	0,34
			50	0,069		0,042	
		COM	40	0,082	0,88	0,059	1,13
			50	0,072		0,067

Figura 4.24. I_{curva} (Variável “temperatura”) – Creep Estático 0,1 MPa

A Figura 4.25 mostra que para o nível de tensão de 0,4 MPa é possível observar com mais clareza a tendência no comportamento de I_{curva} de cada uma das misturas asfálticas sobre o efeito da variação da temperatura de 40 para 50° C. As misturas com CAP 50/70+CAL e CAP 50/70+SBS apresentaram redução nos valores da I_{curva} com o aumento da temperatura, da ordem de 62% para a mistura CAP 50/70+CAL Vv=7% e de, em média, 73% para as misturas CAP 50/70+SBS Vv=4% e Vv=7%. Porém, para as misturas com CAP 50/70 e CAP 50/70+SBS+CAL houve o inverso, maiores propensões à deformação permanente em elevada temperatura, com acréscimos de I_{curva} de 43% e 25%, para as misturas com CAP 50/70 de Vv=4% e de Vv=7%, respectivamente. Com relação à mistura com CAP 50/70+SBS+CAL o efeito da variação de temperatura refletiu somente no comportamento da mistura de Vv=4%, com acréscimo de 26% no valor da I_{curva} . Para a condição de Vv=7%, esse tipo de mistura apresentou pequena alteração nos valores da I_{curva} , sendo essa “confundida” nos desvios de heterogeneidade do CPs ou de problemas de ensaio.

Pode-se dizer que para esse nível de tensão, a variação da *temperatura* é prejudicial para as misturas *CAP 50/70* e *CAP 50/70+SBS+CAL*, ao contrário do que ocorre com as misturas *CAP 50/70+CAL* e *CAP 50/70+SBS*.

Figura 4.25. I_{curva} (Variável "temperatura") – Creep Estático 0,4 MPa

A Tabela 4.17 apresenta os valores médios e taxas de variação de *Recuperação* das misturas asfálticas testadas nas diferentes condições de ensaio. Observa-se que a variação da *temperatura* no ensaio de *0,1 MPa* causou efeitos discretos sobre a *recuperação* das misturas asfálticas, apresentando variações que se enquadram nos limites das porcentagens de desvio de grupo. Somente a mistura com *CAP 50/70* de $V_v=7\%$ que apresentou acréscimo de 37% com a variação da *temperatura* de 40 para 50° C, comportamento esse retratado pelos valores da Tabela 4.17.

Com o aumento do nível de tensão para *0,4 MPa* foi possível observar redução nos valores da porcentagem de *recuperação* para a maioria das misturas asfálticas, exceto as misturas com *CAP 50/70+SBS+CAL* ($V_v=4$ e 7%), *CAP 50/70* ($V_v=4\%$) e com *CAP 50/70+CAL* ($V_v=4\%$) que apresentaram as menores taxas de variações. Para as misturas *CAP 50/70* e *CAP 50/70+CAL* com $V_v=7\%$ a redução foi de 48% e 35%, respectivamente. E para a mistura com *CAP 50/70+SBS* houve redução de 23% para $V_v=4\%$ e de 30% para $V_v=7\%$.

Tabela 4.17. Valores médios e taxas de variação para *Recuperação* – Efeito da Variação da Temperatura

	V _v (%)	Fatores CAL	T(°C)	Creep Estático 0.1 MPa		Creep Estático 0.4 MPa	
				Recuperação (%)	Taxas	Recuperação (%)	Taxas
CAP 50/70	4	SEM	40	81,14	1,00	88,94	0,88
			50	81,54		78,43	
		COM	40	92,93	0,91	85,11	1,18
			50	84,57		100,00	
	7	SEM	40	61,78	1,37	97,30	0,52
			50	84,78		50,22	
		COM	40	78,42	1,02	95,41	0,65
			50	80,04		62,36	
CAP 50/70+SBS	4	SEM	40	76,22	1,12	97,04	0,77
			50	85,42		74,59	
		COM	40	87,10	1,14	73,99	0,98
			50	98,98		72,51	
	7	SEM	40	80,61	0,96	100,00	0,70
			50	77,27		70,43	
		COM	40	64,32	1,15	74,66	1,10
			50	74,21		82,41	

4.3.5. Variação do nível de tensão

Analisando os valores e comportamentos referentes à D_t para todas as condições testadas, apresentadas na Figura 4.26, foi possível notar que com o aumento do nível de tensão de 0,1 MPa para 0,4 MPa, as misturas apresentaram maiores valores de D_t . Quanto às misturas asfálticas com $V_v=4\%$, a mais sensível à variação da tensão de 0,1 para 0,4 MPa foi a mistura com CAP 50/70+SBS+CAL, com acréscimos da ordem de 148% e 101%, para 40 e 50° C, respectivamente. Além disso, é possível entender que a *adição da cal* em misturas com *asfalto modificado* pode prejudicar a capacidade da mistura asfáltica de resistir às deformações para essas condições de ensaio. Para as misturas com $V_v=7\%$, esse efeito ficou mais evidente nas misturas com CAP 50/70 e CAP 50/70+CAL na temperatura de 50° C, com acréscimos de 312% e 239%, respectivamente.

(a)

40 °C

(b)

Figura 4.26. D_t para *creep* estático à 40 e 50 ° C – Variação do Nível de Tensão

A mistura com $V_v=4\%$ que menos sofreu influência sobre os valores da D_t com a variação da *tensão* foi a mistura com CAP 50/70+SBS, apresentando 22% de acréscimo ensaiada à 40 ° C. Para as misturas asfálticas com $V_v=7\%$, todas apresentaram alterações nos valores de D_t , sendo menores para as misturas com CAP 50/70 e CAP 50/70+CAL à 40 ° C, com acréscimos de 36% e 47%, respectivamente. A mistura com CAP 50/70+SBS, submetida ao ensaio na temperatura de 40 ° C, não apresentou nenhuma alteração nos valores da D_t com o aumento do *nível de tensão*, podendo ter ocorrido algum problema no decorrer do ensaio, pois o aumento do *nível de tensão* acarreta no aparecimento de deformação permanente.

Por meio dos resultados apresentados para o M_f na Figura 4.27 não foi possível observar tendências claras, isto porque para o mesmo tipo de mistura houve ganhos e reduções para os valores de M_f com o aumento do nível de tensão, e como o M_f está relacionado a tensão aplicada e a deformação correspondente, pode-se dizer que para maiores valores de M_f , menores são as deformações e vice versa. A maioria das reduções dos valores de M_f ocorreram nos ensaios realizados à temperatura de 50 ° C, para a mistura com CAP 50/70 ($V_v=7\%$) a redução foi de 59%, a com CAP 50/70+CAL ($V_v=4\%$ e $7\%V_v$) de 70% e 69%, a mistura com CAP 50/70+SBS ($V_v=4\%$) de 30%, e para a com CAP 50/70+SBS+CAL ($V_v=4\%$) de 84%. À exceção das misturas que apresentaram reduções na temperatura de 40 ° C que foram os casos da mistura com CAP 50/70+SBS ($V_v=7\%$) com 30% de redução do valor de M_f e da mistura com CAP 50/70+SBS+CAL($V_v=4\%$) com 57%.

Figura 4.27. M_f para *creep* estático à 40 e 50° C – Variação do Nível de Tensão

A figura 4.28 exibe I_{curva} das misturas asfálticas testadas para os ensaios de *creep* estático realizados a 40 e 50° C; nela se pode visualizar as taxas de variação entre os valores para I_{curva} em relação à variação da *tensão*, e pode-se dizer que, para as misturas de Vv=4% com CAP 50/70 e com CAP 50/70+SBS+CAL, houve redução para os valores da I_{curva} com o aumento da tensão de 0,1 MPa para 0,4 MPa, essas reduções foram de aproximadamente 49% e 32%, respectivamente. Foi possível observar que para esses dois tipos de misturas, mesmo com o aumento do nível de tensão, a velocidade de deformação diminuiu. Já para as misturas com CAP 50/70+CAL e com CAP 50/70+SBS de Vv=4% o comportamento foi o contrário, a possibilidade do aparecimento de deformação com o aumento da tensão é maior, isto devido ao acréscimo nos valores da I_{curva} , sendo para a mistura com CAP 50/70+CAL o aumento de 65% à 40° C e 59% à 50° C e para a mistura com CAP 50/70+SBS de 155% à 40° C. Para esse mesmo tipo de mistura com CAP 50/70+SBS de Vv=4%, quando submetida ao ensaio na temperatura de 50° C, apresentou redução no valor da I_{curva} em 29%, ressaltando o benefício do *polímero* SBS em condições de elevada temperatura.

Figura 4.28. I_{curva} para *creep* estático à 40 e 50 °C – Variação do Nível de Tensão

Com relação às misturas com $V_v=7\%$, as porcentagens de acréscimo nos valores da I_{curva} foram, em termos de valores, maiores que as reduções. Variando entre 197% a 443% contra 28% a 40%. A mistura com CAP 50/70 se mostrou mais sensível a variação da *tensão*, apresentando acréscimos na ordem de 365% à 40° C e de 463% à 50° C, seguida da mistura com CAP 50/70+SBS à 40° C com acréscimo de 197% nos valores da I_{curva} , comportamento esse retratado pela Figura 4.28. Com relação as reduções dos valores da I_{curva} , a mistura com CAP 50/70+SBS à 50° C foi a que apresentou menor propensão a deformação mesmo com o aumento do *nível de tensão*, seguida da mistura com CAP 50/70+CAL à 50° C e da com CAP 50/70+SBS+CAL à 40° C, isso por apresentarem reduções nos valores da I_{curva} da ordem de 40%, 35% e 28%, respectivamente.

A Figura 4.29 mostra a *Recuperação* das misturas asfálticas testadas para os ensaios de *creep* estático realizados à 40 e 50° C. As misturas com $V_v=4\%$ que apresentaram alterações consideráveis na *recuperação* com a variação da *tensão* foram as misturas com CAP 50/70+SBS e com CAP 50/70+SBS+CAL, comportamento esse retratado pela Figura

4.29. A mistura com *CAP 50/70+SBS+CAL* apresentou redução de 26% nas *duas condições de temperatura de ensaio*. Para a mistura com *CAP 50/70+SBS* houve acréscimo da *recuperação* somente na temperatura de 40°C sendo essa de 27%. Quanto às misturas com $V_v=7\%$, as misturas com *CAP 50/70* e com *CAP 50/70+CAL* foram as que apresentaram as maiores taxas de variações para a *recuperação*, com acréscimos de 57% e 22%, respectivamente. Porém, na temperatura de 50°C , essas misturas apresentaram reduções da *recuperação* da ordem de 41% e 22%, mostrando que o *aumento da tensão* combinado ao *aumento da temperatura* foram prejudiciais à *recuperação* das misturas com *asfalto convencional* e $V_v=7\%$, inclusive as com *cal*.

Já as com misturas *CAP 50/70+SBS* e *CAP 50/70+SBS+CAL* apresentaram acréscimos de *recuperação* de 24% e 16% na temperatura de 40°C . Quando submetidas aos ensaios na temperatura de 50°C , não foram observadas alterações significativas que influenciassem na *recuperação* em função da variação da *tensão*.

Figura 4.29. *Recuperação para creep estático à 40 e 50°C – Variação do Nível de Tensão*

4.4. CREEP DINÂMICO

Neste item são apresentados e analisados os comportamentos das misturas com CAP 50/70, CAP 50/70+CAL, CAP 50/70+SBS e CAP 50/70+CAL+SBS com base nos parâmetros D_t , M_f e I_{curva} obtidos do ensaio de *creep* dinâmico. A análise de cada parâmetro é feita em função da variação dos fatores *tipo de asfalto*, *adição de cal*, *volume de vazios*, *temperatura* e *nível de tensão* para os valores absolutos dos parâmetros e das taxas de variações de cada tipo de mistura. A Tabela 4.18 e a Tabela 4.19 apresentam o resumo dos resultados de cada parâmetro para cada uma das misturas asfálticas testadas.

Tabela 4.18. Valores médios para os parâmetros $D_t/M_f/I_{curva}$ – *Creep* Dinâmico 0,1 MPa
Creep Dinâmico 0.1MPa

Tipo de Ligante Asfáltico	Vv	40°C			50°C		
		Def. Total (mm/mm)	Mód. de Fluência (MPa)	I _{curva}	Def. Total (mm/mm)	Mód. de Fluência (MPa)	I _{curva}
CAP 50/70	4	0,00058	219,20	0,201	0,00141	64,49	0,462
CAP 50/70+CAL	4	0,00037	450,21	0,125	0,00126	81,55	0,448
CAP 50/70+SBS	4	0,00041	236,00	0,150	0,00097	102,03	0,324
CAP 50/70+SBS+CAL	4	0,00054	187,36	0,135	0,00078	137,21	0,239
CAP 50/70	7	0,00080	123,55	0,365	0,00460	21,65	0,740
CAP 50/70+CAL	7	0,00079	126,14	0,341	0,00266	35,09	0,580
CAP 50/70+SBS	7	0,00038	258,13	0,263	0,00123	73,66	0,457
CAP 50/70+SBS+CAL	7	0,00051	206,28	0,184	0,00091	135,58	0,317

Tabela 4.19. Valores médios para os parâmetros $D_t/M_f/I_{curva}$ – *Creep* Dinâmico 0,4 MPa
Creep Dinâmico 0.4MPa

Tipo de Ligante Asfáltico	Vv	40°C			50°C		
		Def. Total (mm/mm)	Mód. de Fluência (MPa)	I _{curva}	Def. Total (mm/mm)	Mód. de Fluência (MPa)	I _{curva}
CAP 50/70	4	0,00171	233,21	0,332	0,01148	33,81	0,695
CAP 50/70+CAL	4	0,00127	281,90	0,273	0,00712	57,63	0,547
CAP 50/70+SBS	4	0,00071	518,83	0,173	0,00240	148,25	0,413
CAP 50/70+SBS+CAL	4	0,00070	534,35	0,112	0,00223	165,89	0,407
CAP 50/70	7	0,00462	78,10	0,533	0,01360	12,79	0,486
CAP 50/70+CAL	7	0,00332	109,00	0,477	0,02486	14,18	0,942
CAP 50/70+SBS	7	0,00156	227,12	0,289	0,00557	65,30	0,547
CAP 50/70+SBS+CAL	7	0,00151	236,08	0,366	0,00617	59,21	0,580

Analisando de um modo geral os valores dos parâmetros apresentados na Tabela 4.18 e na Tabela 4.19, nota-se que todas as misturas com *asfalto modificado* apresentaram melhores desempenhos à deformação permanente quando comparadas às misturas com *asfalto convencional*, à exceção da condição de nível de tensão igual à 0,1 MPa, na temperatura de 40° C, onde a mistura com CAP 50/70+CAL Vv=4% teve o melhor comportamento.

4.4.1. Tipo de asfalto

O efeito da mudança do *asfalto convencional* para o *modificado* é apresentado neste item, com base nos resultados dos parâmetros *deformação total* (D_t), *módulo de fluência* (M_f) e I_{curva} , dos ensaios de *creep* dinâmico, realizados nas tensões de 0,1 MPa e 0,4 MPa, e nas temperaturas de 40 e 50° C.

A Figura 4.30 apresenta os resultados de *deformação total* de todas as misturas testadas à 0,1 MPa. De modo geral, para a tensão de 0,1 MPa, as misturas asfálticas com *asfalto modificado* apresentaram valores para *deformação total* (D_t) mais baixos quando comparados aos das misturas com *asfalto convencional*. Houve somente uma exceção, e essa se trata da mistura de CAP 50/70+SBS+CAL de $V_v=4\%$ ensaiada à 40° C, que exibiu um acréscimo de 47% no valor D_t em relação à mistura com CAP 50/70+CAL.

Para os demais casos, comparando as misturas com *asfalto modificado* e as com *asfalto convencional*, foi possível observar que para as misturas de $V_v=4\%$ as reduções nos valores da D_t foram da ordem de 33%, e para as misturas de $V_v=7\%$ as reduções foram de 67%. Para ambas as *condições volumétricas* as maiores variações entre os valores da D_t ocorreram nos ensaios realizados à 50° C.

Figura 4.30. Deformação total (%) - Creep Dinâmico à 0,1 MPa

A Figura 4.31 apresenta os resultados de *deformação total* de todas as misturas testadas à 0,4 MPa, nela se pode observar que, o comportamento das misturas asfálticas nesse nível de tensão mostrou a mesma tendência notada para a tensão de 0,1 MPa, ou seja, menores valores de D_t para as misturas com *asfalto modificado*, porém, em termos de valores absolutos, as D_t exibiram valores maiores em resposta ao aumento do nível de tensão do

ensaio. Para essa condição de ensaio, as reduções nos valores da D_t variaram em função do tipo de mistura, por exemplo, para a mistura com $CAP\ 50/70+SBS+CAL$ de $V_v=4\%$ ensaiada à $40^\circ C$ a redução de D_t foi de 45%; já para a mistura com $CAP\ 50/70+SBS$ de $V_v=4\%$ ensaiada à $50^\circ C$ a redução de D_t foi de 79%.

Figura 4.31. Deformação total (%) - Creep Dinâmico à 0,4 MPa

A Figura 4.32 apresenta os resultados de *Módulo de Fluência* (M_f) de todas as misturas testadas nas diferentes condições de tensões e temperaturas de ensaio. As maiores taxas de variações para os valores de M_f ocorreram na condição de ensaio à $0,4\ MPa$ e temperatura de $50^\circ C$; de modo geral, pôde-se notar que o efeito da mudança do *tipo de ligante (convencional para modificado)* aumentou os valores de M_f para todas as combinações de fatores e de ensaio. Quanto às misturas de $V_v=4\%$ essas variações chegaram a valores da ordem de 339% e 188%, para as misturas com $CAP\ 50/70+SBS$ e com $CAP\ 50/70+SBS+CAL$ em relação às misturas de referência; já para a condição volumétrica de $V_v=7\%$, as taxas de variação para as mesmas misturas mencionada foram de 411% e 318%. Essa observação mostra o quanto o M_f foi sensível a mudança da *temperatura* e ao *nível de tensão* dos ensaios, além disso, foi observado que o efeito da *adição de cal* foi menos intenso nas misturas com *asfalto modificado*, mostrando mais uma vez que a cal em misturas com *asfalto modificado* pode não ser vantajosa.

Figura 4.32. *Módulo de Fluência - Creep Dinâmico à 0,1 e 0,4 MPa*

Da Figura 4.32 pode-se notar que as misturas com *asfalto modificado* apresentaram os maiores valores para o M_f quando comparadas às misturas com *CAP convencional*, à exceção da condição de $V_v=4\%$ na temperatura de 40°C , onde a mistura com *asfalto convencional mais cal* submetida à tensão de $0,1\text{ MPa}$ apresentou o maior valor de M_f comparada aos demais tipos de misturas.

As Figura 4.33 e Figura 4.34 apresentam os resultados de *Deformação Total* (D_t) e *Módulo de Fluência* (M_f) de todas as misturas testadas nas diferentes condições de *tensão e temperatura* de ensaio. A partir desses gráficos foi possível notar uma tendência entre os parâmetros M_f e D_t , onde baixos valores de D_t estão associados a altos valores de M_f , ou seja, misturas mais rígidas acumulam menos deformações e vice-versa.

Figura 4.33. Deformação Total x Módulo de Fluência - Creep Dinâmico à 0,1 MPa

Figura 4.34. Deformação Total x Módulo de Fluência - Creep Dinâmico à 0,4 MPa

A Figura 4.35 e Figura 4.36 apresentam, respectivamente, I_{curva} de todas as misturas testadas em diferentes *temperaturas* para os níveis de tensões de 0,1 e 0,4 MPa. Da Figura 4.35, para tensão de 0,1 MPa, foi observado que todas as misturas com *asfalto modificado* apresentaram menores velocidades de deformações (valores I_{curva} mais baixos) indicando indiretamente menor potencial à deformação.

A Figura 4.35 mostra que, para o nível de tensão igual à 0,1 MPa e nas duas *temperaturas* testadas, a vantagem do *asfalto modificado* em reduzir os valores da I_{curva} teve seu maior efeito sobre as misturas *com cal*, uma vez que exibiram maiores taxas de reduções de I_{curva} quando comparadas às taxas apresentadas pelas misturas *sem cal*. As taxas de redução apresentadas pelas misturas com *asfalto modificado* e *cal* foram de 35%.

Figura 4.35. I_{curva} - Creep Dinâmico à 0,1 MPa

Da Figura 4.36, que apresenta os valores de I_{curva} para o nível de tensão de 0,4 MPa, notou-se que, nas *duas temperaturas* de ensaio, a maioria das misturas com *asfalto modificado sem cal* apresentaram maiores taxas de redução para os valores da I_{curva} , à exceção da condição de temperatura de 50° C e de Vv=7% em que houve um discreto incremento de 13% da I_{curva} , esse incremento pode ser explicado com base na característica volumétrica da mistura (Vv=7%) e nas condições de ensaio em elevada *temperatura e tensão*.

Figura 4.36. I_{curva} - Creep Dinâmico à 0,4 MPa

4.4.2. Adição da cal

A Figura 4.37 mostra as D_t das misturas asfálticas testadas para as diferentes condições de *tensão* e *temperatura*. Analisando as taxas de variações de D_t resultantes da *adição da cal* nas misturas asfálticas, foi possível perceber que para as misturas com *asfalto convencional*, o uso da *cal* contribuiu para redução dos valores da D_t , para o nível de tensão igual à 0,1 MPa, à 40° C as maiores taxas de redução ocorreram na condição de Vv=4% e, à 50° C, para Vv=7%, nessas duas condições a redução foi de, em média, 38% .

Para o ensaio realizado na tensão de 0,4 MPa, na temperatura de 50° C, ocorreu um comportamento não esperado em consequência da *adição da cal*, para a mistura asfáltica com CAP 50/70 e Vv=7%, ocorreu o aumento do valor da D_t da ordem de 83%, como pode ser visto na Figura 4.37. Para os demais casos, na temperatura de 40° C, a redução dos valores da D_t foi de cerca de 30% e, na temperatura de 50° C, a redução de D_t foi inferior a 40%.

Figura 4.37. D_t para as misturas com asfalto convencional (Variável “adição da cal”) – Creep Dinâmico 0,1 e 0,4 MPa

Observando-se a Figura 4.38, que apresenta os resultados de D_t relacionados à condição de ensaio à $0,4\text{MPa}$, nota-se que *adição da cal* produziu variações de baixas intensidades nos valores da D_t , isto dificultou o entendimento do efeito da *adição da cal* na mistura com $\text{CAP } 50/70+\text{SBS}$, porque as taxas de variações foram muito baixas e poderiam estar contidas em desvios de erros experimentais; assim, para essa condição, foi concluído que a *adição de cal* não proporcionou mudança no comportamento das misturas com *asfalto modificado*.

Figura 4.38. D_t para as misturas com asfalto modificado (Variável “adição da cal”) – Creep Dinâmico 0,1 e 0,4 MPa

A Figura 4.39 apresenta os M_f das misturas asfálticas testadas em diferentes condições de tensão e temperatura, nela se observa que, nos ensaios realizados à $0,1\text{MPa}$, na temperatura de 50°C , a mistura com *asfalto modificado* se destacou da mistura com *asfalto convencional*, exibindo acréscimos de M_f de 34% para $Vv=4\%$ e 84% para $Vv=7\%$. A mistura com $\text{CAP } 50/70$ somente teve maior ganho nos valores de M_f na condição de $Vv=4\%$ à 40°C , esse acréscimo foi na ordem de 105%. Nos ensaios realizados à $0,4\text{MPa}$, a mistura com *asfalto convencional* apresentou os maiores ganhos nos valores de M_f com a *adição da cal*.

Figura 4.39. M_f (Variável “adição da cal”) – Creep Dinâmico 0,1 e 0,4 MPa

A Figura 4.40 apresenta as I_{curva} das misturas asfálticas testadas em diferentes condições de tensão e temperatura. No que se refere às taxas de variações de I_{curva} , pode-se dizer que, para ensaios realizados à 0,1 MPa, tanto as misturas com *asfalto convencional e modificado* apresentaram redução de I_{curva} com *adição da cal*, variando, em média, de 29% para todas as misturas, salvo as misturas com CAP 50/70 ($V_v=4\%$) à 50° C, e a com CAP 50/70 ($V_v=7\%$) e com CAP 50/70+SBS ($V_v=4\%$) à 40° C, que mantiveram o mesmo valor para I_{curva} com a *adição de cal*.

Para o nível de tensão de 0,4 MPa, as misturas com *asfalto convencional e modificado* com $V_v=4\%$ apresentaram reduções nos valores da I_{curva} , ao contrário do que ocorreu com as misturas com $V_v=7\%$. Nota-se também que para esse nível de tensão (0,4 MPa) as misturas com *asfalto convencional* sofreram maiores variações nos ensaios à 50° C e, para a mistura com *asfalto modificado* as maiores variações ocorreram nos ensaios à 40° C, sugerindo que o efeito da *adição da cal* em misturas asfálticas poderia estar associado à temperaturas específicas.

Figura 4.40. I_{curva} (Variável “adição da cal”) – Creep Dinâmico 0,1 e 0,4 MPa

4.4.3. Variação do volume de vazios

A Tabela 4.20 apresenta os valores de D_t das misturas asfálticas testadas em diferentes condições de tensão e temperatura. Observando-se os valores de D_t pode-se constatar que a variação do *volume de vazios* de 4 para 7% resultou em incrementos nos valores da D_t de todos os tipos de misturas asfálticas testadas, as misturas com CAP 50/70 e com CAP 50/70+CAL foram as mais suscetíveis (com aumento de D_t de até 250%) quando comparadas as demais misturas.

Para as misturas asfálticas com asfaltos *convencionais e modificados*, os maiores incrementos ocorreram nos ensaios realizados a 0,4 MPa na temperatura de 50°C. Para o nível de tensão igual à 0,1 MPa, na temperatura de 40°C, as misturas com CAP 50/70+SBS e com CAP 50/70+SBS+CAL não apresentaram de aumento importante D_t em função da variação de Vv de 4 para 7%; somente na temperatura de 50°C foi possível notar alguma variação de D_t em resposta à variação de Vv, e mesmo assim não tão pronunciada quanto as demais.

Vale ressaltar que, para nível de tensão de 0,4 MPa e temperatura de 50°C, os incrementos de D_t das misturas com CAP 50/70+SBS+CAL foram maiores que as com

CAP 50/70+SBS, sendo de 177% e 132%, respectivamente; mostrando, mais uma vez, o efeito negativo da *cal* nas misturas com *asfalto modificado* em *elevadas temperaturas*. Ainda com relação aos valores de D_t , percebeu-se que os ensaios em *tensões e temperaturas* mais altas foram mais eficientes na detecção de comportamentos particulares nas misturas com *asfalto modificado*.

Tabela 4.20. Valores médios e taxas para *Deformação Total* – Efeito da *variação do volume de vazios* – *Creep Dinâmico*

			<i>Creep Dinâmico 0.1 MPa</i>		<i>Creep Dinâmico 0.4 MPa</i>	
	<i>T(°C)</i>	<i>Fatores CAL Vv (%)</i>	<i>D_t (mm/mm)</i>	<i>Taxas</i>	<i>D_t (mm/mm)</i>	<i>Taxas</i>
<i>CAP 50/70</i>	40	SEM	4	0,00058	1,39	0,00171
			7	0,00080		0,00462
		COM	4	0,00037	2,16	0,00127
			7	0,00079		0,00332
	50	SEM	4	0,00141	3,27	0,01148
			7	0,00460		0,01360
		COM	4	0,00126	2,11	0,00712
			7	0,00266		0,02486
<i>CAP 50/70+SBS</i>	40	SEM	4	0,00041	0,93	0,00071
			7	0,00038		0,00156
		COM	4	0,00054	0,95	0,00070
			7	0,00051		0,00151
	50	SEM	4	0,00097	1,27	0,00240
			7	0,00123		0,00557
		COM	4	0,00078	1,16	0,00223
			7	0,00091		0,00617

A Tabela 4.21 apresenta os valores de M_f das misturas asfálticas testadas em diferentes condições de tensão e temperatura. O comportamento de M_f mostrou que as misturas asfálticas que apresentaram maiores D_t foram as que exibiram menores M_f , como discutido anteriormente partir da Figura 4.33 e Figura 4.34. Contudo, é interessante que se entenda o efeito da variação do V_v e a intensidade sobre M_f , por isso, a Figura 4.41 apresenta o M_f de todas as misturas testadas nas diferentes condições de tensão e temperatura.

Tabela 4.21. Valores médios e taxas para *Módulo de Fluência* – Efeito da *variação do volume de vazios* – *Creep Dinâmico*

	<i>T</i> (°C)	<i>Fatores</i>		<i>Creep Dinâmico 0.1 MPa</i>		<i>Creep Dinâmico 0.4 MPa</i>	
		<i>CAL</i>	<i>V_v</i> (%)	<i>M_f</i> (MPa)	<i>Taxas</i>	<i>M_f</i> (MPa)	<i>Taxas</i>
<i>CAP 50/70</i>	40	SEM	4	219,2	0,56	233,2	0,33
			7	123,5		78,1	
		COM	4	450,2	0,28	281,9	0,39
			7	126,1		109,0	
	50	SEM	4	64,5	0,34	33,8	0,38
			7	21,7		12,8	
		COM	4	81,6	0,43	57,6	0,25
			7	35,1		14,2	
<i>CAP 50/70+SBS</i>	40	SEM	4	236,0	1,09	518,8	0,44
			7	258,1		227,1	
		COM	4	187,4	1,10	534,4	0,44
			7	206,3		236,1	
	50	SEM	4	102,0	0,72	148,3	0,44
			7	73,7		65,3	
		COM	4	137,2	0,99	165,9	0,36
			7	135,6		59,2	

De modo geral, da Figura 4.41, pode-se notar que o M_f das misturas com *asfalto convencional* exibiram uma tendência clara de comportamento, onde o aumento de V_v de 4 para 7% propiciou a redução de M_f . Com relação às misturas com *asfalto modificado*, este comportamento foi observado na condição de ensaio à 0,4 MPa; à tensão de 0,1 MPa o M_f parece não ter sido um bom indicador do efeito da *variação de V_v* nas misturas com *asfalto modificado*.

Figura 4.41. M_f (Variável “volume de vazios”) – *Creep Dinâmico* 0,1 e 0,4 MPa

A Tabela 4.22 apresenta as I_{curva} das misturas asfálticas testadas em diferentes condições de *tensão e temperatura*, onde se pode notar que todos os tipos de misturas apresentaram acréscimos no valor desse parâmetro com a variação do V_v , indicando que todas as misturas com $V_v=7\%$ apresentam maiores velocidades de deformação quando comparadas às misturas de $V_v=4\%$. Em geral, as I_{curva} foram maiores nas misturas com *asfalto*

convencional, contudo, em termos de taxa de variação, as misturas com *asfalto modificado* se mostraram mais sensíveis à mudança de V_v .

Para as misturas com *asfalto convencional*, nas duas *temperaturas*, as maiores taxas de variações em função do aumento de V_v ocorreram no ensaio à $0,1 \text{ MPa}$. Para o nível de tensão de $0,4 \text{ MPa}$, as misturas *sem cal*, com *asfalto convencional e modificado*, apresentaram taxas de variação próximas nas duas temperaturas. Com relação às misturas *com cal* submetidas à tensão de $0,4 \text{ MPa}$, a mistura com *asfalto modificado* foi a que apresentou maior taxa de variação, da ordem de 228%, para temperatura de 40° C .

Tabela 4.22. Valores médios e taxas para I_{curva} – Efeito da *adição da cal* – *Creep Dinâmico*

			<i>Creep Dinâmico 0.1 MPa</i>		<i>Creep Dinâmico 0.4 MPa</i>	
	<i>T(°C)</i>	<i>Fatores CAL V_v (%)</i>	<i>I_{curva}</i>	<i>Taxas</i>	<i>I_{curva}</i>	<i>Taxas</i>
CAP 50/70	40	SEM 4	0,201	1,82	0,332	1,60
			0,365		0,533	
		COM 4	0,125	2,74	0,273	1,75
			0,341		0,477	
	50	SEM 4	0,462	1,60	0,695	0,70
			0,740		0,486	
CAP 50/70+SBS	40	SEM 4	0,150	1,75	0,173	1,67
			0,263		0,289	
		COM 4	0,135	1,36	0,112	3,28
			0,184		0,366	
	50	SEM 4	0,324	1,41	0,413	1,33
			0,457		0,547	
		COM 4	0,239	1,32	0,407	1,42
			0,317		0,580	

4.4.4. Variação da temperatura

A Tabela 4.23, a Figura 4.42 e a Figura 4.43 apresentam um resumo dos resultados de D_t para todas as misturas asfálticas testadas nas diferentes condições de *tensão e temperatura* a fim de evidenciar e melhor visualizar os efeitos proporcionados pela variação da *temperatura* de ensaio de 40 para 50° C .

Em geral, o efeito da variação da *temperatura* foi muito importante na intensidade dos efeitos propiciados pela mudança de níveis das variáveis; nas misturas com *asfalto convencional*, a taxa de variação de D_t chegou a 649%, enquanto para as misturas com *asfalto modificado* a taxa de incremento foi de no máximo de 300%. Isso sugere que as misturas com *asfalto convencional* foram mais suscetíveis à variação da temperatura, além disso, os valores

de D_t dessas misturas, em termos absolutos, foram sempre maiores que os das misturas com *asfalto modificados*.

Comparando as deformações das misturas preparadas com os dois tipos de asfalto, observou-se que algumas misturas com *asfalto modificado* exibiram D_t de 4 a 5 vezes menores que as D_t das misturas com *asfalto convencional*, como por exemplo, se constata dos valores de D_t das misturas CAP 50/70 e CAP 50/70+SBS, à 50° C.

Com a variação da *temperatura*, todos os tipos de mistura vieram a apresentar incrementos sobre os valores da D_t , sendo em maiores proporções para o nível de tensão igual à 0,4 MPa, chegando até à 571% para a mistura com CAP 50/70 ($V_v=4\%$), 649% para a com CAP 50/70+CAL ($V_v=7\%$), 257% para a com CAP 50/70+SBS ($V_v=7\%$) e de 308% para a com CAP 50/70+SBS+CAL ($V_v=7\%$).

Tabela 4.23. Valores médios e taxas para *Deformação Total* – Efeito da variação de *temperatura* – *Creep Dinâmico*

	V_v (%)	Fatores		Creep Dinâmico 0.1 MPa		Creep Dinâmico 0.4 MPa	
		CAL	T(°C)	D_t (mm/mm)	Taxas	D_t (mm/mm)	Taxas
CAP 50/70	4	SEM	40	0,00058	2,44	0,00171	6,71
			50	0,00141		0,01148	
		COM	40	0,00037	3,45	0,00127	5,62
			50	0,00126		0,00712	
	7	SEM	40	0,00080	5,77	0,00462	2,94
			50	0,00460		0,01360	
		COM	40	0,00079	3,36	0,00332	7,49
			50	0,00266		0,02486	
CAP 50/70+SBS	4	SEM	40	0,00041	2,36	0,00071	3,37
			50	0,00097		0,00240	
		COM	40	0,00054	1,46	0,00070	3,17
			50	0,00078		0,00223	
	7	SEM	40	0,00038	3,21	0,00156	3,57
			50	0,00123		0,00557	
		COM	40	0,00051	1,78	0,00151	4,08
			50	0,00091		0,00617	

As Figura 4.42 e Figura 4.43 mostram como as misturas com *asfalto convencional* foram mais vulneráveis à variação da *temperatura* que as com *asfalto modificado*, pois tanto as misturas com *asfalto convencional*, *sem e com cal*, foram as que apresentaram maiores taxas de incremento de D_t (representado nas figuras pela distância entre os pontos). Com relação à mistura com CAP 50/70+SBS+CAL essa se mostrou menos sensível a variação da *temperatura* quando comparada às demais, apresentando, em geral, menores incremento de D_t nos dois níveis de *tensão e V_v* , exceto para a mistura com $V_v=7\%$ na condição de nível de

tensão de $0,4 \text{ MPa}$, em que a taxa de variação de 308% foi maior que as exibidas pelas misturas com *CAP 50/70* e com *CAP 50/70+SBS*.

Figura 4.42. D_t (Variável “temperatura”) – Creep Dinâmico $0,1 \text{ MPa}$

Figura 4.43. D_t (Variável “temperatura”) – Creep Dinâmico $0,4 \text{ MPa}$

A Tabela 4.24 apresenta um resumo dos resultados de M_f para todas as misturas asfálticas testadas nas diferentes condições de *tensão e temperatura*. Dela se pode concluir que os valores de M_f , se mostraram muito sensíveis à variação da temperatura de 40 para 50°C , as misturas com *asfalto convencional*, por exemplo, foram as que exibiram maiores perdas de M_f em função do aumento da *temperatura*, chegando a exibir M_f aproximadamente 10 vezes menor à temperatura de 50°C , como foi o caso da mistura com *CAP 50/70+CAL* e $V_v=7\%$, ensaiada à tensão de $0,4 \text{ MPa}$.

Tabela 4.24. Valores médios e taxas para *Módulo de Fluência* – Efeito da variação de *temperatura* – *Creep Dinâmico*

				<i>Creep Dinâmico 0.1 MPa</i>		<i>Creep Dinâmico 0.4 MPa</i>	
				$M_f(MPa)$	<i>Taxas</i>	$M_f(MPa)$	<i>Taxas</i>
	V_v (%)	Fatores CAL	$T(^{\circ}C)$				
CAP 50/70	4	SEM	40	219,2	0,29	233,2	0,14
			50	64,5		33,8	
		COM	40	450,2	0,18	281,9	0,20
			50	81,6		57,6	
	7	SEM	40	123,5	0,18	78,1	0,16
			50	21,7		12,8	
CAP 50/70+SBS	4	SEM	40	236,0	0,43	518,8	0,29
			50	102,0		148,3	
		COM	40	187,4	0,73	534,4	0,31
			50	137,2		165,9	
	7	SEM	40	258,1	0,29	227,1	0,29
			50	73,7		65,3	
		COM	40	206,3	0,66	236,1	0,25
			50	135,6		59,2	

Já para as misturas com *asfalto modificado*, as reduções de M_f foram menos intensas, uma vez que o aumento da temperatura levou à redução máxima de 4 vezes o valor de M_f à $40^{\circ}C$, verificado para a mistura CAP 50/70+SBS+CAL e $V_v=7\%$, ensaiada à tensão de $0,4 MPa$. De modo geral, para o nível de tensão igual à $0,4 MPa$, as misturas asfálticas apresentaram maiores variações para os valores de M_f que nos ensaios à $0,1 MPa$.

A Tabela 4.25 apresenta um resumo dos resultados de I_{curva} para todas as misturas asfálticas testadas nas diferentes condições de *tensão e temperatura*, nela se pode observar que, em termos de valores absolutos, as I_{curva} foram maiores para as misturas com *asfalto convencional*, indicando que a velocidade de deformação dessas misturas é maior e que tem potencial de acumular maiores deformações eventualmente.

Tabela 4.25. Valores médios e taxas para I_{curva} – Efeito da variação de temperatura – Creep Dinâmico

				Creep Dinâmico 0,1 MPa		Creep Dinâmico 0,4 MPa	
Fatores				I_{curva}		I_{curva}	
Vv (%)				Taxas		Taxas	
CAL							
T(°C)							
CAP 50/70	4	SEM	40	0,2	2,29	0,3	2,09
			50	0,5		0,7	
		COM	40	0,1	3,60	0,3	2,00
			50	0,4		0,5	
	7	SEM	40	0,4	2,03	0,5	0,91
			50	0,7		0,5	
		COM	40	0,3	1,70	0,5	1,97
			50	0,6		0,9	
CAP 50/70+SBS	4	SEM	40	0,2	2,16	0,2	2,39
			50	0,3		0,4	
		COM	40	0,1	1,78	0,1	3,65
			50	0,2		0,4	
	7	SEM	40	0,3	1,74	0,3	1,89
			50	0,5		0,5	
		COM	40	0,2	1,73	0,4	1,58
			50	0,3		0,6	

Para o nível de tensão igual à 0,1 MPa, as misturas com *ligante convencional* se mostraram mais suscetíveis à variação da *temperatura*. Entretanto, para o nível de tensão igual à 0,4 MPa, as misturas com *asfalto modificado* se mostraram mais sensíveis a essa variação. Para as misturas com *asfalto convencional*, *as com cal*, submetidas ao ensaio à tensão de 0,1 MPa, apresentaram maiores taxas de variações. Nos ensaios à 0,4 MPa, foi possível observar alterações consideráveis para os valores da I_{curva} de todas as misturas testadas, exceto a mistura com *asfalto convencional sem cal* de Vv=7%.

4.4.5. Variação do nível de tensão

A Figura 4.44 apresenta os resultados de D_t de todas as misturas asfálticas testadas nas diferentes condições de tensão e temperatura, dela pode-se entender que o aumento do nível de tensão de 0,1 MPa para 0,4 MPa resultou em incrementos para os valores da D_t . As misturas com *asfalto convencional (sem e com cal)* se mostraram mais suscetíveis à *variação da tensão* comparada as misturas com *asfalto modificado (sem e com cal)*. Também foi possível observar que o efeito da variação da tensão sobre D_t é destacado pela condição *temperatura* de ensaio, *volume de vazios* e combinação entre eles, por exemplo, os resultados das misturas com CAP 50/70.

Figura 4.44. D_t (Variável “tensão”) – Creep Dinâmico 0,1 e 0,4 MPa

De modo geral, as misturas com CAP 50/70 exibiram D_t maiores que as com CAP 50/70+SBS, além disso, as taxas de incremento foram muito menores para as misturas com *asfalto modificado*, sugerindo que essas misturas são menos suscetíveis à variação da tensão. Para se ter uma ordem de grandeza dessa suscetibilidade, pode-se citar dois exemplos, a mistura com CAP 50/70+SBS ($V_v=4\%$) cuja D_t aumentou em 1,5 vezes com o aumento da tensão de 0,1 para 0,4 MPa; e a mistura com CAP 50/70 ($V_v=4\%$) que teve o D_t aumentado em 7 vezes para a mesma mudança de *tensão*.

A Figura 4.45e a Figura 4.46 apresentam os valores de M_f e D_t de todas as misturas asfálticas testadas nas diferentes *tensão* e *temperatura*. Essas figuras são assim apresentadas, primeiro, por permitir a análise do comportamento de M_f frente à variação de tensão de 0,1 para 0,4 MPa e, segundo, porque, como se observou a relação entre os parâmetros D_t e M_f , tem-se a intenção de entender não somente o efeito isolado da variável no parâmetro de ensaio, mas também entender a intensidade do efeito e o comportamento das misturas testadas (efeito combinado).

Na Figura 4.45 e na Figura 4.46, observando os M_f (curvas tracejadas) pode-se notar que o efeito do aumento da tensão propiciou variações pouco expressivas dos valores do parâmetro, com tendência de discreta redução de M_f com o aumento da *tensão*; de forma geral, para todas as misturas asfálticas, os valores de M_f foram sempre inferiores a 300 MPa, exceto a *mistura com cal* ensaiada à 0,1 MPa, cujo M_f à 40° C foi de 500 MPa.

As misturas com *asfalto modificado* exibiram uma tendência controversa: M_f aumenta com *aumento da tensão* de ensaio. Teoricamente, uma explicação provável para o aumento de

M_f com *asfalto modificado* seria a diminuição dos deslocamentos, o que seria somente justificável por alguma propriedade típica do modificador nesta *faixa de temperatura*.

Figura 4.45. $Dt \times M_f \times Temperatura$ – Creep Dinâmico 0,1 MPa

Figura 4.46. Dt x Mf x Temperatura – Creep Dinâmico 0,4 MPa

Em termos de efeito, pode-se concluir que o M_f de misturas com *asfalto convencional* diminuem com o aumento da *tensão de ensaio* e nas misturas com *asfalto modificado* o M_f aumenta com a *variação da tensão*. Já em termos de intensidade do efeito, notou-se que o aumento da tensão não promoveu variações de grandes intensidades nos valores de M_f com algumas exceções já mencionadas.

No que se refere ao comportamento de M_f e D_t , mais uma vez pode-se notar que, em geral, maiores D_t estão associadas a M_f menores e vice-versa. Das figuras 4.45 e 4.46 depreende-se que para valores de M_f menores que 250 MPa as D_t foram inferiores a 0.200%, para misturas com $V_v=4\%$. Quanto às misturas com $V_v=7\%$ essa tendência não é tão clara e separa dois grupos de comportamento: o das misturas com *asfalto convencional* e o das com *asfalto modificado*.

A Figura 4.47 apresenta os valores de I_{curva} de todas as misturas asfálticas testadas nas diferentes *tensão e temperatura*. Com relação às taxas encontradas para I_{curva} , pode-se notar que a maioria das misturas asfálticas apresentaram maiores I_{curvas} com a variação da *tensão*, para as misturas com $V_v=7\%$ esse comportamento foi mais destacado. Além disso, combinado ao efeito da *temperatura*, os valores de I_{curva} e suas variações ficaram mais evidentes, com isso, foi possível concluir que para cada condição de volumétricas, as misturas mostram maior velocidade à deformação com a variação da *tensão*.

Figura 4.47. I_{curva} (Variável “tensão”) – Creep Dinâmico 0,1 e 0,4 MPa

Para as misturas com *ligante convencional*, a mistura com CAP 50/70+CAL foi a que apresentou maiores taxas de incremento para I_{curva} , na ordem de 119% para as misturas com $V_v=4\%$ à 40°C e 62% para misturas com $V_v=7\%$ à 50°C.

Para as mistura com CAP 50/70 só foi possível observar a tendência em apresentar maiores deformações com o aumento do nível de tensão na condição $V_v=4\%$ à 50°C, com a taxa de incremento no valor de 51% contra 22% para mistura com CAP 50/70+CAL.

No caso das misturas com *asfalto modificado*, foi possível observar como o uso da *cal* interfere no comportamento da mistura com relação à capacidade de resistir à deformação,

pois, para as misturas com $V_v=7\%$, (a) a com *CAP 50/70+SBS+CAL* apresentou acréscimo da taxa de variação da ordem de 100% à $40^\circ C$ e 80% à $50^\circ C$, e (b) a com *CAP 50/70+SBS* manteve o valor da taxa de variação da I_{curva} com o aumento do nível de tensão, mostrando pequena intensidade do efeito dessa variação sobre esse tipo de mistura.

Porém, quando se trata da condição de $V_v=4\%$, a mistura com *CAP 50/70+SBS* apresentou variações consideráveis, da ordem de 15% à $40^\circ C$ e 27% à $50^\circ C$, mas menores quando comparados da mistura com *CAP 50/70+SBS+CAL*, que exibiram variações de 17% para $40^\circ C$ e 70% para $50^\circ C$. De forma geral, para as misturas com *CAP 50/70+SBS* os valores da I_{curva} foram sempre menores que os valores das misturas com *CAP 50/70*, mostrando que as misturas com *asfalto modificado* são menos propensas a acumularem deformação.

CAPÍTULO

5. CONCLUSÕES

Nesta pesquisa foi desenvolvido um estudo dos efeitos de alguns fatores na deformação permanente de misturas asfálticas densas à luz de seus comportamentos mecânicos obtidos de ensaios de fluência uniaxial. Os fatores relacionados à mistura asfáltica considerados no estudo da deformação permanente foram: (1) o tipo de asfalto; (2) o volume de vazios; e (3) a adição de cal. No que se refere a fatores externos, os considerados neste estudo foram: a temperatura; o tipo de carregamento; e o nível de tensão empregados nos ensaios.

Quando do início da pesquisa buscou-se entender a influência das variáveis selecionadas sobre a deformação permanente, desta forma, esse capítulo apresenta as principais conclusões desta pesquisa na tentativa de responder aos primeiros questionamentos sobre:

- (a) Se a modificação do asfalto com polímero SBS melhoraria a resistência à deformação permanente;
- (b) Se as misturas asfálticas com volume de vazios mais altos e compostas por diferentes tipos de asfalto teriam o mesmo potencial de deformação permanente;
- (c) Se o uso da cal seria vantajoso em misturas com asfaltos convencional e modificado quanto ao comportamento das misturas à deformação permanente;
- (d) Se há alguma particularidade comportamental decorrente da mudança nas tensões de ensaio, do tipo de carregamento e da temperatura.

Os ensaios de fluência uniaxial estática e dinâmica foram selecionados para a avaliação da deformação permanente, por se tratarem de métodos que envolvem equipamentos relativamente simples, procedimentos de rápidas execuções, e disponíveis na unidade em que essa pesquisa se realizou. As principais constatações sobre a deformação

permanente são relacionadas aos resultados desses ensaios, contudo, foram realizados ensaios de módulo de resiliência e resistência à tração, a fim de observar variações dessas propriedades em resposta à variação dos fatores.

5.1. SOBRE O EFEITO DO TIPO DE ASFALTO

A comparação entre os comportamentos de misturas asfálticas testadas indicou que o *asfalto modificado com polímero SBS* apresentou menor propensão à deformação permanente que o *asfalto convencional (CAP 50/70)*. Isto foi constatado a partir da apreciação dos resultados de *creep* dinâmico, onde as misturas com *asfalto modificado* apresentaram menores *deformação total (Dt)* e *inclinação da curva (I_{curva})* e maiores *módulos de fluência (M_f)* quando comparados aos valores exibidos pelas misturas com *asfalto convencional*. De modo geral, foi possível observar esses comportamentos na maioria das condições de ensaios, porém, em condições de temperaturas mais altas (50° C) e maiores tensões de ensaio (0,4 MPa) estes efeitos são destacados.

Os resultados de *creep* estático não permitiram observar tendências claras de comportamento ou concluir acerca do efeito da mudança do tipo de asfalto em nenhuma das condições testadas.

5.2. SOBRE O EFEITO DO VOLUME DE VAZIOS

A comparação entre os comportamentos indicou que o *aumento do V_v de 4 para 7%* aumenta o potencial das misturas asfálticas de se deformarem. Os resultados de *creep* dinâmico, mostraram que as misturas com $V_v=7\%$ apresentam em geral maiores *deformação total (Dt)* e *inclinação da curva (I_{curva})* e menores *módulos de fluência (M_f)* quando comparados aos valores exibidos pelas misturas com $V_v=4\%$. De modo geral, foi possível observar esses comportamentos para todas as condições de tensão e temperatura de ensaio.

Quanto aos resultados de *creep* estático, foi possível observar essas tendências de comportamento do efeito da *mudança do volume de vazios* somente na condição mais severa (*tensão de 0,4 MPa e temperatura de 50° C*).

5.3. SOBRE O EFEITO DA ADIÇÃO DE CAL

Para as misturas com *asfalto convencional*, quanto aos resultados de *creep* estático, foi observado que a *adição de cal* reduz a tendência à deformação permanente, comportamento esse observado somente na condição mais severa do ensaio (*tensão de 0,4 MPa e temperatura de 50° C*).

Com relação às misturas com *ligante modificado*, confrontando os comportamentos das *misturas sem e com cal*, notou-se que a *adição de cal* produziu o efeito de menor intensidade em relação aos outros fatores, não permitindo concluir sobre a tendência de comportamento da mistura com *asfalto modificado e cal*, em nenhuma das condições de ensaio testadas.

5.4. SOBRE O EFEITO DA MUDANÇA DAS CARACTERÍSTICAS DE ENSAIO

As mudanças das características de ensaio ocorreram em três elementos: temperatura, tensão e tipo de carregamento. Quanto à *variação de temperatura do ensaio de 40 para 50° C*, ficou evidente que essa foi a variável do programa experimental cujo efeito apresentou maior intensidade, uma vez que todos os parâmetros se mostraram sensíveis a esta variação. Além disso, consegue-se a partir desse “artifício” salientar tendências de comportamentos, o que se mostrou essencial para a interpretação dos resultados de *creep* estático.

Quanto à *variação da tensão de ensaio de 0,1 para 0,4 MPa*, foi observado que essa variação foi a segunda mais importante no que se refere à intensidade dos efeitos. O aumento da tensão aumenta o potencial das misturas de se deformarem. De forma similar ao aumento da temperatura de ensaio, foi possível a partir desse “artifício” destacar tendências de comportamentos. A tensão de 0,4 MPa em combinação com a temperatura de ensaio de 50° C permitiu observar tendências de comportamentos para os dois tipos de ensaio, *estático* e *dinâmico*. Nessa configuração, pode-se dizer que todas as misturas apresentaram piora da resistência à deformação permanente, contudo, misturas com *asfalto convencional* podem ser mais prejudicadas, sobretudo, quando avaliadas a carregamentos dinâmicos.

Com relação ao *tipo de carregamento de ensaio*, estático e dinâmico, a avaliação foi comparativa, mas qualitativa, uma vez que os parâmetros não são confrontados; foi analisada a capacidade do ensaio de revelar tendências de comportamento e relações entre parâmetros. Com esse enfoque, pode-se dizer que o *creep* estático não conseguiu evidenciar tendências claras de comportamento, especialmente em condições de tensão e temperatura baixas ($0,1 \text{ MPa}$ e 40°C); já para condições mais severas ($0,4 \text{ MPa}$ e 50°C) foi possível detectar alguns padrões de comportamento, com vantagem para as misturas com *asfalto convencional*.

Com relação ao *creep* dinâmico, foi possível interpretar os efeitos das variáveis e entender o comportamento das misturas para todas as condições de ensaio (mais e menos severas), além disso, o *creep* dinâmico apresentou menores desvios dos resultados. Com esse procedimento foi possível notar que as misturas com *asfalto modificado* são menos suscetíveis à deformação permanente.

5.5. SOBRE A RIGIDEZ, A RESISTÊNCIA E A DETERIORAÇÃO DAS MISTURAS SUBMETIDAS A ENSAIOS PRÉVIOS

Nesta pesquisa foram efetuados ensaios de MR em duas temperaturas (25 e 40°C) e a partir desse resultados pode-se constatar que a *temperatura* e a *variação do volume de vazios* foram os fatores mais importantes para a variação de MR. Com relação à RR, foi possível observar o efeito da *temperatura*, do *tipo de asfalto*, do *volume de vazios* e do *uso da cal* na variação desse parâmetro. Há uma relação entre o MR e RR, onde as misturas com valores mais baixos de MR apresentam maiores valores para RR, indicando que misturas menos rígidas apresentam recuperações mais lentas, essa constatação é razoável se for lembrado que menores valores de rigidez foram consequência do aumento da temperatura de ensaio, aliás relação MR e RR é destacada em decorrência do efeito da *temperatura* mais elevada.

No que se refere à resistência das misturas asfálticas, pode-se concluir que (a) misturas com *asfalto modificado* apresentam maiores RT que as com *asfalto convencional*, principalmente as misturas *sem cal*; (b) o impacto do aumento do *volume de vazios* para 7% é maior na redução da RT das misturas com *asfalto convencional* e (c) a *adição de cal* é benéfica para o aumento da RT somente para as misturas com *asfalto convencional*

Quanto aos danos eventuais causados aos CPs após os ensaios de *creep* estático e dinâmico à 40 e 50° C, observou-se a redução de RT em todas as misturas testadas previamente, entretanto, as misturas com $V_v=7\%$ submetidas aos ensaios de *creep* a 50° C foram as que sofreram as maiores reduções de RT. Neste contexto, ressalta-se que misturas com o *asfalto modificado* a deterioração foi menor.

CAPÍTULO

6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Em relação à influência da cal nas misturas asfálticas, indica-se adotar a adição da *cal* em substituição ao fíler mineral, mantendo-se características volumétricas similares entre misturas sem e com cal, e deste modo verificar o efeito da cal no comportamento mecânico das misturas asfálticas.
- No que se refere às condições de ensaio de *creep* estático e dinâmico, sugere-se adotar níveis maiores de tensão (por ex.: 0,7 MPa) e aumento da temperatura (por ex.: 60° C), a fim de reduzir o tempo de ensaio e de caracterizar a ruptura dos corpos de prova, permitindo assim que seja analisada a curva de fluência das misturas asfálticas.
- Quanto à comparação entre métodos de avaliação de deformação permanente, propõe-se confrontar os resultados do ensaio de *creep* dinâmico com os de ensaios de trilha de roda, como, por exemplo, o do simulador de tráfego do *Laboratoire Central de Ponts e Chaussées* (LCPC) e estudar eventuais correlações entre os seus parâmetros e critérios.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AL-ABDUL WAHHAB, H.I.; FATANI, M.N.; NOURELDIN, A.S.; BUBSHAIT, A.; ALDUBABE, I.S. (1995). National study of asphalt pavement rutting in Saudi Arabia. *Transportation Research Record* 1473, p.35-42. Washington, D.C.

ANANI, B.A; BALGHUNAIM, F.A; AL-HAZZAA, A.S. (1990). Laboratory and Field study of pavement rutting in Saudi Arabia. *Transportation Research Record* 1259, p.79-90. Washington, D.C.

BERNUCCI, L.B.; MOURA, E. de; LEITE, L.M. (2002). Efeitos do uso de asfalto modificados nas propriedades mecânicas dos revestimentos asfálticos. *2º Simpósio sobre Obras Rodoviárias*, RODO 2002, São Paulo.

BERNUCCI, L.B.; MOURA, E. de; LEITE, L.M.; MOTTA, R. (2008). Avaliação comparativa da deformação permanente em misturas asfálticas produzidas com ligantes asfálticos convencionais por borracha. XXII ANPET, *Congresso Nacional de Pesquisa e Ensino em Transportes*, Fortaleza.

BUTTON, J.W., PERDOMO D., LYTTON R.L. (1999). Influence of Aggregate on Rutting of Asphalt Concrete Pavements. *Transportation Research Record* 1259, p.141-152. Washington, D.C.

COELHO, V. (1996). *Contribuição ao estudo das deformações permanentes, nas condições do Brasil, em camadas de concreto asfáltico de pavimentação*. Tese de doutorado. Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo (EESC), 281p. São Carlos.

EPPS, J.A.; LITTLE, D.N. (2001). *The benefits of hydrated lime in hot mix asphalt*. Prepared for National Lime Association, 48p.

FURLAN, A. P.; GIGANTE, A. C.; FABBRI, G. T. P. (2006). Estudo comparativo do módulo de resiliência de misturas asfálticas densas determinado a partir dos procedimentos de cálculo da AASHTO e da NCHRP. XX Congresso Nacional de Pesquisa e Ensino em

Transportes, 2006, Brasília. Panorama Nacional da Pesquisa e Ensino em Transportes, 2006. p. 1134-1145.

GIGANTE, A.C. (2007). *Avaliação da suscetibilidade térmica e do efeito das condições ambientais no enrijecimento de misturas asfálticas densas à luz de seus comportamentos resilientes*. Dissertação de mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo (EESC), 169p. São Carlos.

HENSLEY, M.J.; LEAHY, R.B. (1989). Asphalt concrete mixtures as relates to pavement rutting: case studies. *Transportation Research Record* 1217, p.87-96. Washington, D.C.

HICKS, G. H. (1991). Moisture damage in asphalt concrete – NCHRP 175 – *National Cooperative Highway Research*, Program Synthesis of Highway Practice Transportation Research Board.

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

HORST, E. (2000). Stone Mastic Asphalt – Pavement Technology. In: *Anais do 15º Encontro de Asfalto*, artigo IBP 62000, pp. 143-151, Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil, 04-06 Dezembro.

HUBER, G.A. (1999). Methods to achieve rut-resistant durable pavements. Synthesis of Highway Practice 274. National Cooperative Highway Research Program. *Transportation Research Board*. Washington, D.C.

HUNTER, R. N. (2000). *Asphalt in road construction*. Lanham, Maryland. Thomas Telford.

KALOUSH K. E.; WITCZAK M.W. (2002). Tertiary flow characteristics of asphalt mixtures. . *Journal of Association Asphalt Paving Technology* 71, p.278-306.

KAMEL, N.I.; MILLER, L.J. (1994). Comparative performance of pavement mixes containing conventional and engineered asphalt. *Transportation Research Record* 1454, p.172-180. Washington, D.C.

LAI, J.S; HUFFERD, W.L. (1976). Predicting permanent deformation of asphalt concrete from creep tests. *Transportation Research Record* 616, p.41-43. Washington, D.C.

LIME (2006). FACT SHEET: Hydrated lime – A solution for high performance hot-mix asphalt. National Lime Association. Arlington, Virginia.

LINDEN, R.N; MAHONEY, J.P.; JACKSON, N.C. (1989). Effect of compaction on asphalt concrete performance. *Transportation Research Record* 1217, p.20-28. Washington, D.C.

LITTLE D. N.; PETERSEN J.C. (2005). Unique effects of hydrated lime filler on the performance-related properties of asphalt cements: Physical and chemical interactions revisited. *Journal of Materials in Civil Engineering*, v. 17, N° 2, p. 207-218. Disponível em: <http://cedb.asce.org/cgi/WWWdisplay.cgi?146274>

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. Washington, D.C.

MAHBOUB, K. (1990). Asphalt concrete creep as related to rutting. *Journal of Material in Civil Engineering*, v.2, n.3, p.147-163.

MOHAMED, E.H.H.; YUE. Z. (1994). Criteria for evaluation of rutting potential based on repetitive uniaxial compression test. *Transportation Research Record* 1454, p.74-81. Washington, D.C.

MOHAMMAD, L.N; ABADIE C.; GOKMEN R.; PUPPALA A. J. (2000). Mechanistic evaluation of hydrated lime in hot-mix asphalt mixtures. *Transportation Research Record* 1723, p.26-36. Washington, D.C.

MOHAMMED L.N.; SHADI S.; KABIR M.; OTHMAN A.; COOPER S. (2008). Mechanistic properties of hot-mix asphalt mixtures containing hydrated lime. *Transportation Research Record* 2051, p.49-63. Washington, D.C.

MOTTA, L.M.G.; LEITE, F.L.M.; CONSTANTINO, R.S.; TONIAL, I.A. (1996). Curso sobre o programa SHRP: Aplicação a ligantes, agregados e misturas betuminosas. *Instituto Brasileiro de Petróleo*. Rio de Janeiro, RJ, 1996.

MOURA, E. de (2010). *Estudo da deformação permanente em trilha de roda de misturas asfálticas em pista e em laboratório*. Tese de doutorado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (EPUSP), 299p. São Paulo.

NASCIMENTO, L.A.H. (2008). *Nova abordagem da dosagem de misturas asfálticas densas com uso do compactador giratório e foco na deformação permanente*. Dissertação de mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – Universidade Federal do Rio de Janeiro (COPPE), 204p. Rio de Janeiro.

ROBERTS, F.L.; KHANDAL, P.S.; BROWN, E.R. (1996). *Hot mix asphalt materials, mixture design, and construction*. 2 ed. NAPA Education Foundation, Lanhan, Maryland.

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 – IBP*, p.91-115.

SANTANNA-GRECO, J.A.S. (2004). *Avaliação da influência de alguns fatores nas propriedades mecânicas de misturas asfálticas densas, à luz da técnica de planejamento e análise de experimentos fatoriais fracionários assimétricos*. Tese de doutorado. Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo (EESC), 340p. São Carlos.

SENGUL C.E.; AKSOY A.; ISKENDER E.; OZEN H. (2011). Hydrated lime treatment of asphalt concrete to increase permanent deformation resistance. *Construction and Building Materials*, v. 30, Nº 4, p. 139-148. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061811007082>

SOUZA, J.B.; CRAUS, J.; MONISMITH, C.L (1991). Summary report on permanent deformation on asphalt concrete. Publicação SHRP-A/IR-91-104. *Strategic Highway Program (SHRP)*

TAIRA, C. (2001). *Avaliação do desempenho em laboratório de misturas asfálticas densas utilizando asfalto convencional (CAP-20) e asfalto modificado com polímero SBS (BETUFLEX B 65/60)*. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo (EESC), 153p. São Carlos.

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

TAYFUR, S.; OZEN, H.; AKSOY, A. (2007). Investigation of rutting performance of asphalt mixtures containing polymer modifiers. *Construction and Building Materials*, v 21, I.2 p. 328-337. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2005.08.014>

UGE, P.; VAN DE LOO, P. J. (1974). *Permanent deformation of asphalt mixes*. Koninklijke/Shell-Laboratorium, Amsterdã, Holanda. Novembro.

ULMGREN, N. (1996). Functional testing of asphalt mixes for permanent deformation by dynamic creep test – Modification of method and round robin test. EAPA / Eurobitume Congress, Strasbourg 7-10 May 1996.

VALKERING, C.P.; LANCON, D.J.; DE HILSTER, E.; STOKER, D.A. (1990). Rutting resistance of asphalt mixes containing non-conventional and polymer-modified binders. *Symposium – Improves Rut Resistance, Association of Asphalt Paving Technologists (AAPT), Proceedings*, v.43, p.253-258.

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. Washington, D.C.

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

WESSELING, D. H.; SPECHT, L. P.; CERATTI, J. A. P. (2003). Estudo laboratorial do comportamento de misturas em concreto asfáltico com diferentes tipos de fílers. *34ª Reunião anual de pavimentação*. São Paulo, p.307- 321.

YILDIRIM, Y; IDEKER, J.; HAZLETT D. (2006). Evaluation of viscosity values for mixing and compaction temperatures. *Journal of Materials in Civil Engineering*, v. 18, Nº 4, p. 545-553. Disponível em: <http://cedb.asce.org/cgi/WWWdisplay.cgi?153893>

YODER. E.J.; WITCZAK. M.W. (1975). *Principles of pavement design*. 2.ed., John Wiley & Sons. Inc. New York.

ÖZEN, H. (2010). Rutting evaluation of hydrated lime and SBS modified asphalt mixtures for laboratory and field compacted samples. *Construction and Building Materials*, v 25, p. 756-765.

ANEXOTabela A.1. Propriedades volumétricas das misturas asfálticas com $V_v=4\%$

<i>Tipo de Mistura Asfáltica</i>	<i>V_v=4%</i>					
	<i>CP</i>	<i>Altura CP</i>	<i>V_v (%)</i>	<i>VCB (%)</i>	<i>VAM (%)</i>	<i>RBV (%)</i>
<u><i>CAP 50/70+CAL</i></u>	1	67,77	3,6	9,9	13,5	73,6
	2	67,47	3,5	9,9	13,5	73,7
	3	68,00	3,8	9,9	13,7	72,3
	4	67,60	3,8	9,9	13,7	72,4
	5	67,60	3,7	9,9	13,6	73,0
	6	67,60	3,9	9,9	13,8	71,7
<u><i>CAP 50/70</i></u>	7	68,07	4,0	9,9	13,9	71,5
	8	68,37	4,2	9,9	14,1	70,4
	9	68,43	4,1	9,9	14,0	70,9
	10	68,07	4,2	9,9	14,1	69,9
	11	67,87	4,3	9,9	14,2	69,7
	12	68,10	4,0	9,9	13,9	71,4
<u><i>CAP 50/70+SBS+CAL</i></u>	13	67,13	4,1	10,4	14,5	71,8
	14	66,83	3,7	10,4	14,1	73,7
	15	67,13	3,4	10,5	13,9	75,3
	16	67,07	4,2	10,4	14,5	71,4
	17	67,20	3,9	10,4	14,3	72,8
	18	66,77	3,9	10,4	14,3	72,6
<u><i>CAP 50/70+SBS</i></u>	19	68,00	4,0	10,4	14,4	72,2
	20	67,53	3,8	10,4	14,1	73,4
	21	67,83	4,0	10,4	14,3	72,3
	22	67,53	4,0	10,4	14,3	72,4
	23	67,93	4,1	10,3	14,5	71,4
	24	67,93	4,3	10,3	14,6	70,5

Tabela A.2. Propriedades volumétricas das misturas asfálticas com Vv=7%

<i>Tipo de Mistura Asfáltica</i>	<i>Vv=7%</i>					
	<i>CP</i>	<i>Altura CP</i>	<i>Vv (%)</i>	<i>VCB (%)</i>	<i>VAM (%)</i>	<i>RBV (%)</i>
<i><u>CAP 50/70</u></i>	31	69,67	7,2	9,6	16,7	57,3
	32	69,87	6,8	9,6	16,4	58,7
	33	70,03	7,2	9,6	16,8	57,2
	34	69,77	7,0	9,6	16,6	57,9
	35	69,77	6,7	9,6	16,4	58,9
	36	70,53	6,9	9,6	16,6	58,0
<i><u>CAP 50/70+CAL</u></i>	43	68,87	6,3	9,6	16,0	60,5
	44	69,00	6,7	9,6	16,3	59,1
	45	69,23	6,6	9,6	16,2	59,3
	46	69,27	6,5	9,6	16,1	59,8
	47	69,70	6,4	9,6	16,1	59,9
	48	69,10	6,4	9,6	16,1	60,0
<i><u>CAP 50/70+SBS</u></i>	55	69,53	7,0	10,1	17,1	58,8
	56	69,37	7,0	10,1	17,1	58,8
	57	69,23	7,0	10,1	17,1	59,1
	58	69,13	6,6	10,1	16,7	60,4
	59	69,27	7,1	10,1	17,2	58,5
	60	69,27	7,0	10,1	17,0	59,1
<i><u>CAP 50/70+SBS+CAL</u></i>	67	69,97	6,5	10,1	16,6	60,8
	68	69,77	6,6	10,1	16,7	60,3
	69	71,27	6,7	10,1	16,8	60,0
	70	69,97	7,0	10,1	17,0	59,1
	71	69,53	6,8	10,1	16,9	59,6
	72	68,73	6,3	10,1	16,4	61,8