

Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Escola de engenharia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

**EFEITOS DA ADIÇÃO DE CALES NA VIDA DE FADIGA DE
CONCRETOS ASFÁLTICOS COM AGREGADOS DE BASALTO E
LIGANTES CONVENCIONAL E MODIFICADO**

Alex Roberto Granich

**Porto Alegre
2015**

ALEX ROBERTO GRANICH

**EFEITOS DA ADIÇÃO DE CALES NA VIDA DE FADIGA DE
CONCRETOS ASFÁLTICOS COM AGREGADOS DE BASALTO E
LIGANTES CONVENCIONAL E MODIFICADO**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como requisito parcial à obtenção
do título de Mestre em Engenharia.

Orientador: Prof. Dr. Washington Peres Núñez

CIP - Catalogação na Publicação

Granich, Alex Roberto

EFEITOS DA ADIÇÃO DE CALES NA VIDA DE FADIGA DE
CONCRETOS ASFÁLTICOS COM AGREGADOS DE BASALTO E
LIGANTES CONVENCIONAL E MODIFICADO / Alex Roberto
Granich. -- 2015.

116 f.

Orientador: Prof. Dr. Washington Peres Núñez.

Coorientador: Prof. Jorge Augusto Pereira Ceratti.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal do
Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Programa de
Pós-Graduação em Engenharia Civil, Porto Alegre, BR-
RS, 2015.

1. Pavimentação asfáltica. 2. Vida de fadiga. 3.
Cal. 4. Análise mecanística. I. Núñez, Prof. Dr.
Washington Peres , orient. II. Ceratti, Prof. Jorge
Augusto Pereira, coorient. III. Título.

ALEX ROBERTO GRANICH

**EFEITOS DA ADIÇÃO DE CALES NA VIDA DE FADIGA DE
CONCRETOS ASFÁLTICOS COM AGREGADOS DE
BASALTO E LIGANTES CONVENCIONAL E MODIFICADO**

Esta dissertação de mestrado foi julgada adequada para a obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA na Área de Geotecnia, e aprovada em sua forma final pelo professor orientador e pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, 16 de outubro de 2015

Prof. Washington Peres Núñez

Dr. pelo PPGEC/UFRGS

Orientador

Prof. Jorge Augusto Pereira Ceratti

D.Sc. pela COPPE/UFRJ

Orientador

Prof. Dr. Carlos Torres Formoso

Coordenador do PPGEC/UFRGS

BANCA EXAMINADORA

Prof. Glauco Tulio Pessa Fabbri (EESC – USP)

D.Sc. pela EESC – USP

Prof. Lélío Antônio Teixeira Brito (PUC/RS)

PhD pela University of Nottingham

Prof. Luiz Carlos Pinto da Silva Filho (UFRGS)

PhD pela University of Leeds

Dedico este trabalho a meus pais Sergio e Ceni, ao meu
irmão Eduardo e a minha namorada Júnia por todo o
apoio.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a minha namorada Júnia Bassan pela compressão nos momentos de ausência em virtude da lavra da dissertação, pela ajuda quando demandada, pelo companheirismo que nunca faltou e por estar sempre ao meu lado durante esta caminhada.

Aos meus pais e irmão pelo afeto familiar e por me apoiarem incondicionalmente.

Ao meu mestre, orientador e amigo Professor Washington, pelo conhecimento transmitido de forma maestral e por sempre ter confiado na minha capacidade.

Aos amigos pela amizade, convívio, e também pelo apoio no laboratório. Daniel, Vinícius, Douglas, André, Rodrigo Weber, João Rodrigo, Lucas Delongui, Larissa, William Fedrigo, Fabrício Barboza, Fabiano Nienov e Lucas Festugato. Levarei vossa amizade pra vida toda.

Ao Professor Ceratti, ao Professor Lélío e a Professora Luciana Rohde pela ajuda quando solicitados e pelos ensinamentos passados.

Ao Professor Glauco e novamente ao Professor Lélío e ao Professor Luiz Carlos por se fazerem presentes e transmitindo o seu conhecimento através do exame deste trabalho.

Ao CNPq e a CAPES, pela bolsa auxílio.

A tarefa não é tanto ver aquilo que ninguém viu, mas
pensar o que ninguém ainda pensou sobre aquilo que todo
mundo vê.

Arthur Schopenhauer

RESUMO

GRANICH, A. R. **Efeitos da adição de cales na vida de fadiga de concretos asfálticos com agregados de basalto e ligantes convencional e modificado**. 2015. Tese (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

O crescente aumento do tráfego rodoviário comercial demanda o desenvolvimento de novas tecnologias que proporcione pavimentos de elevado desempenho e durabilidade. Nesse contexto, desde 2006 se estuda, no laboratório de pavimentação da UFRGS, melhorias em propriedades de concretos asfálticos devidas à incorporação de cal. Este estudo complementa o estudo relatado por Bock (2012) que evidenciou o aumento do módulo de resiliência, da resistência à tração, das resistências às deformações permanentes e ao dano por umidade induzida, nesta dissertação são apresentados e analisados os resultados de ensaios de fadiga. Foram realizados no modo tensão controlada, em corpos-de-prova cilíndricos de seis misturas constituídas por agregado de basalto, ligante convencional (CAP 50/70) ou polimerizado (CAP E 60/85), com e sem adição de cales (calcítica ou dolomítica). Os resultados foram modelados em função da tensão de tração, da diferença de tensões e, principalmente, da deformação específica no início do ensaio. Empregaram-se os modelos de fadiga obtidos no estudo, e através de curvas, constatou-se que: nos concretos asfálticos elaborados com ligante convencional, a adição de 1% de cal calcítica aumentou-se a vida de fadiga cerca de 4,5 vezes no caso de revestimentos delgados (5 e 10 cm) e em 2,9 vezes e 1,9 vezes no caso de revestimentos mais espessos (15 e 20 cm, respectivamente). A adição de cal dolomítica a misturas com CAP 50/70 afetou a vida de fadiga de forma ainda mais notável, com aumentos que variaram de 42 vezes para revestimentos com 5 cm a 2,7 vezes para revestimentos com 20 cm. Quando são analisados o efeito da adição de cales em misturas em ligante polimerizado constatou-se comportamento homogêneo, com aumento de vida de fadiga entre 31 (revestimento de 5 cm) e 35 vezes (revestimento de 20 cm), quando a cal adicionada é calcítica, e com ligeira redução (10%) na vida de fadiga quando se adicionou cal dolomítica. Como esperado, os concretos asfálticos com ligante modificado apresentaram vida de fadiga maiores, sendo o efeito do ligante ainda maior quando se acrescentou cal calcítica. Os resultados sugerem que há interação química entre o tipo de ligante e o tipo de cal. Globalmente, os resultados da pesquisa mostraram que a incorporação da cal calcítica sempre aumentou a vida de fadiga dos concretos asfálticos, e que quando se empregou ligante convencional (CAP 50/70) também podem-se obter aumentos expressivos com cal dolomítica. Aliados aos benefícios na resistência a deformação permanente, e ao dano por umidade induzida já conhecidos para as misturas estudadas, os resultados apresentados nesta dissertação permitem concluir que a incorporação de cal permite obter concretos asfálticos de elevados desempenho e durabilidade.

Palavras-chaves: Pavimentação asfáltica; vida de fadiga; cal; análise mecânica.

ABSTRACT

GRANICH, A. R. **Effects of lime addition in asphalt concrete fatigue life with basalt aggregate and conventional and modified binders.** 2015. MSc. Dissertation. Department of Civil Engineering. Federal University of Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

Increasing commercial road traffic demands the development of new technologies to provide higher performance and durable pavements. In this context, since 2006 it's been studied, in the pavements laboratory of UFRGS, improvements in asphalt concrete properties due to the lime incorporation. Following previous study reported by Bock (2012) which showed an increase of resilient modulus, tensile strength, the resistance to permanent deformation and damage induced by moisture, in this dissertation is presented and analyzed the results of fatigue tests. They were performed in controlled stress mode, in cylindrical specimens, consisting of six asphalt mixtures with basalt aggregate, conventional binder (CAP 50/70) or modified binder (CAP E 60/85) with and without addition of lime (calcitic or dolomitic). The results were modeled as a function of tensile stress, the stress difference, and especially the specific strain at baseline. Employing the fatigue models obtained in the study through curves it was found that: on the asphaltic concrete made with the conventional binder, the addition of 1% of calcitic lime increased fatigue life about 4.5 times in the case of thin asphalt layer (5 and 10 cm) and 2.9 times and 1.9 times in the case of thicker asphalt layer (15 and 20 cm, respectively). The addition of dolomitic lime mixtures with CAP 50/70 affect the fatigue life in an even more remarkable way with an increase ranging from 42 times to asphalt concrete with 5 cm to 2.7 times to 20 cm. When are examined the effect of adding lime in polymerized binder mixtures, it was found that the behavior was homogeneous, with increased fatigue life between 31 (5 cm asphalt mixture) and 35 times (20 cm asphalt mixture) when the added lime is calcitic, and with slight decrease (10%) in fatigue life when dolomitic lime was added. As expected, the modified binder asphalt concrete presented greater fatigue life, and the effect was further identified when calcitic lime was added. The results suggest that there is a chemical interaction between the type of binder and the type of lime. Overall, the research results showed that the incorporation of calcitic lime always increased the fatigue life of asphalt concrete, which was used when the conventional binder (CAP 50/70) may also obtain significant increases with dolomitic lime. In addition to the benefits in resistance to permanent deformation, and induced by moisture damage already expected for the mixtures studied, the results presented in this thesis can be concluded that the incorporation of lime allows to obtain asphalt concrete with high-performance and durability.

Keywords: Asphalt pavements; fatigue life; lime; mechanistic analysis

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Equipamento para ensaio de fadiga em amostra trapezoidal	22
Figura 2: Equipamento para ensaios de fadiga em amostra diametral	22
Figura 3: Equipamento para ensaios de fadiga em vigota (configuração quatro pontos).....	23
Figura 4: Ensaio com vigota em flexão	28
Figura 5: Ensaio de fadiga por tração indireta.....	29
Figura 6: Prensa MTS.....	31
Figura 7: Deformação inicial “pico-a-pico” versus número de ciclos de ruptura de fadiga para misturas L4 (baixo teor de ligante e alto volume de vazios) e L9 (alto teor de ligante e baixo volume de vazios).....	44
Figura 8: Parâmetros Marshall das misturas com ligante convencional CAP 50/70 para cinco diferentes teores de ligante	60
Figura 9: Parâmetros Marshall das misturas com ligante modificado CAP 60/85 para cinco diferentes teores de ligante	61
Figura 10: Efeitos da incorporação de cales na resistência à tração e no módulo de resiliência a 25°C em misturas com ligante convencional CAP 50/70 (RT e MR em MPa).....	62
Figura 11: Efeitos da incorporação de cales na resistência à tração e no módulo de resiliência a 25°C em misturas com ligante modificado CAP 60/85 (RT e MR em MPa).....	62
Figura 12: Efeitos da incorporação de cales na resistência retida a tração a 25°C em misturas com CAP 50/70 e CAP 60/85 (%).....	63
Figura 13: Deslocamentos obtidos para as misturas ensaiadas	71
Figura 14: Curvas de estado das misturas com ligante convencional CAP 50/70 e com ligante modificado CAP 60/85 (%)	75
Figura 15: Composição granulométrica adotada no estudo - Faixa C DNIT	81
Figura 16: Distribuição granulométrica das cales e agregados utilizados no estudo	83
Figura 17: Apresentação do equipamento de fadiga por compressão diametral, com o sistema de controle da pressão do ar.	84
Figura 18: Apresentação do equipamento de fadiga por compressão diametral com o pórtico.	85
Figura 19: Apresentação do equipamento de fadiga por compressão diametral com câmara termo-regulável.....	85
Figura 20: Passo-a-passo da montagem do ensaio, posicionamento do LVDT	86

Figura 21: Passo-a-passo da montagem do ensaio com nivelamento do CP.....	86
Figura 22: Passo-a-passo da montagem do ensaio com liberação da contrapressão.....	86
Figura 23: Configuração dos pavimentos simulados no software <i>EVERSTRESS 5.0</i>	88
Figura 24: Curva de vida de fadiga <i>versus</i> deformação específica inicial (ϵ_i) para misturas de referência (sem cal) com ligante convencional.	89
Figura 25: Curva de vida de fadiga <i>versus</i> deformação específica inicial para misturas com cal calcítica e ligante convencional.....	90
Figura 26: Curva de vida de fadiga <i>versus</i> deformação específica inicial para misturas com cal dolomítica e ligante convencional.	90
Figura 27: Curva de vida de fadiga <i>versus</i> deformação específica inicial para misturas de referência (sem cal) com ligante modificado.	90
Figura 28: Curva de vida de fadiga <i>versus</i> deformação específica inicial para misturas com cal calcítica e ligante modificado.	91
Figura 29: Curva de vida de fadiga <i>versus</i> deformação específica inicial para misturas com cal dolomítica e ligante modificado.	91
Figura 30: Curva de vida de fadiga <i>versus</i> diferença de tensões para misturas de referência (sem cal) com ligante convencional.	92
Figura 31: Curva de vida de fadiga <i>versus</i> diferença de tensões para misturas com cal calcítica e ligante convencional.	92
Figura 32: Curva de vida de fadiga <i>versus</i> diferença de tensões para misturas com cal dolomítica e ligante convencional.....	93
Figura 33: Curva de vida de fadiga <i>versus</i> diferença de tensões para misturas de referência (sem cal) com ligante modificado.	93
Figura 34: Curva de vida de fadiga <i>versus</i> diferença de tensões para misturas com cal calcítica e ligante modificado.	93
Figura 35: Curva de vida de fadiga <i>versus</i> diferença de tensões para misturas com cal dolomítica e ligante modificado.	94
Figura 36: Curva de vida de fadiga <i>versus</i> tensão de tração para misturas de referência (sem cal) com ligante convencional.	94
Figura 37: Curva de vida de fadiga <i>versus</i> tensão de tração para misturas com cal calcítica e ligante convencional.....	94
Figura 38: Curva de vida de fadiga <i>versus</i> tensão de tração para misturas com cal dolomítica e ligante convencional.....	95

Figura 39: Curva de vida de fadiga <i>versus</i> tensão de tração para de referência (sem cal) com ligante modificado.	95
Figura 40: Curva de vida de fadiga <i>versus</i> tensão de tração para misturas com cal calcítica e ligante modificado.	95
Figura 41: Curva de vida de fadiga <i>versus</i> tensão de tração para misturas com cal dolomítica e ligante modificado.	96
Figura 42: Comparativo entre as diferentes curvas para vida de fadiga <i>versus</i> deformação específica inicial.	96
Figura 43: Comparativo entre as diferentes curvas para vida de fadiga <i>versus</i> diferença de tensões	97
Figura 44: Comparativo entre as diferentes curvas para vida de fadiga <i>versus</i> tensão de tração..	97
Figura 45: Comparativo entre misturas ensaiados no LAPAV – vida de fadiga em função da deformação específica inicial	98
Figura 46: Comparativo entre misturas ensaiados no LAPAV – vida de fadiga em função datensão de tração (MPa)	98
Figura 47: Comparativo entre misturas ensaiadas no LAPAV – vida de fadiga em função da diferença de tensões (MPa)	99
Figura 48: N_f para diferentes espessuras e diferentes misturas asfálticas	102
Figura 49: Comparação de vidas de fadigas de misturas deste estudo e misturas ensaiadas por Specht (2004).....	103
Figura 50: Resultados da regressão múltipla.	105
Figura 51: Gráfico de valores previstos pelo modelo e valores medidos.	105
Figura 52: Gráfico tridimensional do modelo estatístico obtido.	106

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Impacto da cal hidratada na vida de fadiga torsional de misturas asfalto-areia (Little e Kim, 2002).....	56
Tabela 2: Relação de E* com cal e E* sem cal de Witczak e Bari (2004).....	56
Tabela 3: Parâmetros de dosagem Marshall para misturas com ligante convencional CAP 50/70 nos teores de projeto (Misturas de referência, com cal calcítica e com cal dolomítica).....	59
Tabela 4: Parâmetros de dosagem Marshall para misturas com ligante modificado CAP 60/85 nos teores de projeto (Misturas de referência, com cal calcítica e com cal dolomítica)	59
Tabela 5: Variação dos resultados de RRT, RT e MR com incorporação de 1% e 2% de cal.....	65
Tabela 6: Variação percentual das propriedades das misturas asfálticas em função da incorporação de cal e condicionamento das amostras (25°C)	66
Tabela 7: Variação percentual das propriedades das misturas asfálticas em função da incorporação de cal e condicionamento das amostras (35°C)	66
Tabela 8: Principais características das misturas Metodologia UCL	74
Tabela 9: Classificação do agregado quanto a quantidade de Sílica presente.....	77
Tabela 10: Propriedades do ligante convencional - CAP 50/70(ANP, 2005)	81
Tabela 11: Propriedades do ligante modificado - CAP 60/85 (ANP, 2010)	81
Tabela 12: Propriedades dos agregados pétreos utilizados	82
Tabela 13: Distribuição granulométrica dos agregados e cales utilizados	82
Tabela 14: Características físicas das cales utilizadas.....	83
Tabela 15: Características químicas das cales utilizadas.....	83
Tabela 16: Configuração do carregamento utilizado na análise mecânica dos pavimentos ensaiado	87
Tabela 17: Configuração das camadas dos pavimentos utilizados na análise mecânica dos ensaios	88
Tabela 18: Módulos de resiliência utilizados na análise mecânica dos pavimentos ensaiados.....	88
Tabela 19: Deformações abaixo de uma roda nos eixos x-x e y-y, em microstrain.....	100
Tabela 20: Deformações entre as rodas nos eixos x-x e y-y, em microstrain... ..	100
Tabela 21: Valores críticos de Nf abaixo de uma roda.....	101

Tabela 22: Valores críticos de Nf entre as rodas.	101
Tabela 23: Vida de fadiga no campo para diferentes espessuras e diferentes misturas asfálticas.	101
Tabela 24: Módulos de resiliência (MPa) para as misturas asfálticas de Specht (2004).....	102

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AASHTO: American Association of State Highway and Transportation Officials
AASHO: American Association of State Highway Officials
ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas
ALF: Accelerated Loading Facility
ANP: Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustível
ANTT: Agência Nacional de Transporte Terrestre
ASTM: American Society of Testing and Materials
CA: Concreto asfáltico
CAP: Cimento asfáltico de petróleo
CAP E: Cimento asfáltico de petróleo modificado por polímero elastomérico
CBUQ: Concreto betuminoso usinado à quente
CC: Misturas asfálticas com ligante convencional (CAP 50/70) e cal Calcítica
CCP: Concreto de cimento Portland
CD: Misturas asfálticas com ligante convencional (CAP 50/70) e cal Dolomítica
CIENTEC: Fundação Ciência e Tecnologia
CNT: Confederação Nacional de Transporte
CP: Corpo-de-prova
CS: Misturas asfálticas com ligante convencional (CAP 50/70) e sem cal
d: Diâmetro do Corpo-de-prova
DAER/RS: Departamento Autônomo de Estradas de Rodagem do Rio Grande do Sul
DC: Deformação controlada
DF: Deformações
DL: Deslocamentos
DNER: Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DNIT: Departamento Nacional de Infraestrutura e Transportes
E*: Módulo complexo
EME: Misturas de módulo elevado (Enrobé à module élevé)
Et al: “e outros”
EVA: Copolímero de estireno acetato de vinila
F: Força Aplicada
FHWA: Federal Highway Administration

FLC: Fator laboratório-campo (ou “*shift factor*”)
LAPAV: Laboratório de Pavimentação da UFRGS
LCPC: Laboratoire central des Ponts et Chaussées
LVDT: Linear variable differential transducer
MEPDG: Guia de projeto de pavimentos mecanístico-empírico da AASHTO
MC: Misturas asfálticas com ligante modificado (60/85) e cal Calcítica
MD: Misturas asfálticas com ligante modificado (60/85) e cal Dolomítica
MTS: Material test system
MR: Módulo de resiliência
MS: Misturas asfálticas com ligante modificado (60/85) e sem cal
N: Número de aplicações de um eixo padrão
NCHRP: National Cooperative Highway Research Program
Nf: Vida de fadiga
Ns: Vida de serviço
RBV: Relação betume vazios
RT: Resistência à tração por compressão diametral
RRT: Resistência retida à tração
SBS: Estireno-butadieno-estireno
SBR: Borracha de butadieno estireno
SHRP: Strategic Highway Research Program
 S_{mix} : Rigidez à flexão
So: Módulo de rigidez por flexão
TC: Tensão controlada
TT: Tensão de tração
UCL®: Universal de Caracterización de Ligantes
UFRGS: Universidade Federal do Rio Grande do Sul
 V_a : Volume de vazios
 V_b : Volume de ligante
VFB: Vazios preenchidos com ligante
VV: Volume de vazios

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	19
1.1 OBJETIVOS	20
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	21
2.1 TRINCAMENTO POR FADIGA	21
2.1.1. Tipos de ensaios de fadiga	26
2.1.1.1 Ensaios com Vigotas em Flexão	26
2.1.1.2 Ensaios com Amostras Cilíndricas em Torção	28
2.1.1.3 Ensaios de Tração Uniaxial	28
2.1.1.4 Ensaios de Tração Indireta	29
2.1.1.5 Ensaios de Flexão em Amostras Trapezoidais	29
2.2 EQUIPAMENTOS PARA ENSAIOS	30
2.2.1 Problemas relacionados aos ensaios de fadiga	32
2.3 PREVISÃO DE VIDA E DE DANO POR FADIGA	36
2.3.1 Previsão de vida de fadiga baseada na deformação	38
2.3.1.1 Modelos baseados na deformação da mistura	38
2.3.1.2 Modelos baseados na deformação e rigidez da mistura	39
2.3.1.3 Modelos baseados na deformação, rigidez e volume de ligante da mistura	42
2.3.1.4 Modelos baseados na deformação, rigidez e vazios da mistura preenchidos com ligante	44
2.3.2 Modelos de previsão de vida de fadiga utilizando energia dissipada	50
2.4 IMPACTO DA CAL NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE MISTURAS ASFÁLTICAS À QUENTE	54
2.5 ESTUDOS PRECEDENTES	57
2.5.1 Dosagem	57
2.5.1.2 Resistência e módulo de resiliência	61

2.5.1.3 Adesividade	62
2.5.1.4 Estudo do teor a ser utilizado.....	63
2.5.2 Caracterização mecânica das misturas.....	65
2.5.2.1 Resistência à tração.....	66
2.5.2.3 Avaliação das Deformações Permanentes através de Creep Dinâmico....	70
2.5.3 Aplicação da metodologia UCL® para verificação da influência da cal hidratada nas misturas asfálticas	73
2.6 MATERIAIS PARA EXECUÇÃO DE MISTURAS ASFÁLTICAS	76
2.6.1 Agregados	76
2.6.2 Ligantes asfálticos convencionais	77
2.6.3 Ligantes asfálticos modificados	78
2.6.4 Cal Hidratada.....	79
3 EQUIPAMENTOS, MATERIAIS E MÉTODOS	80
3.1 MATERIAIS UTILIZADOS.....	81
3.2 ENSAIO DE FADIGA POR COMPRESSÃO DIAMETRAL	84
3.3 ANÁLISE MECANÍSTICA DOS RESULTADOS OBTIDOS COM O ENSAIO DE FADIGA	87
4 RESULTADOS	89
4.1 ENSAIOS DE FADIGA POR COMPRESSÃO DIAMETRAL.....	89
4.2 ANÁLISE MECANÍSTICA DOS RESULTADOS DOS ENSAIOS DE FADIGA POR COMPRESSÃO DIAMETRAL	99
4.3 MODELAGEM ESTATÍSTICA DOS RESULTADOS DOS ENSAIOS DE FADIGA POR COMPRESSÃO DIAMETRAL	103
5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS.....	107
5.1 CONCLUSÕES	107
5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	108
REFERÊNCIAS	109

ANEXOS	114
ANEXO A – Dados dos ensaios de fadiga.....	114
ANEXO B – Deformações abaixo de uma roda nos eixos x-x e y-y, em microstrain, para Specht (2004)	115
ANEXO C – Deformações entre as rodas nos eixos x-x e y-y, em microstrain, para Specht (2004)	115
ANEXO D – Valor crítico de vida de fadiga abaixo de uma roda para Specht (2004).....	115
ANEXO E - Valor crítico de vida de fadiga entre as rodas para Specht (2004)	116
ANEXO F – Vida de fadiga à diferentes espessuras e diferentes misturas asfálticas para Specht (2004)	116

1 INTRODUÇÃO

Face ao crescente aumento do tráfego rodoviário comercial torna-se indispensável desenvolver e aplicar novas tecnologias, que reduzem os custos operacionais de manutenção e alonguem a vida dos pavimentos.

No que tange o modal rodoviário, destaca-se a importância de misturas asfálticas que constituem 98% dos revestimentos de estradas brasileiras. Contribuem para a enorme predominância dos pavimentos flexíveis, menor custo inicial e a maior facilidade construtiva e de manutenção quando comparados com pavimentos rígidos.

Entende-se, assim, que no Brasil, bem como no resto do mundo tenham sido e continuam sendo realizados no desenvolvimento de ligantes e misturas asfálticas de elevado desempenho. Destacam-se, entre outros, os avanços na produção de ligantes modificados por polímeros, tendo especial destaque no Brasil o rápido crescimento do asfalto-borracha além de polímeros tradicionais, como o SBS.

Nas duas últimas décadas, e de forma mais ampla nos anos 2000, foram divulgados, nos Estados Unidos, resultados encorajadores sobre os efeitos benéficos da adição de cal aos concretos asfálticos. De vários estudos daquele País, surgiram relatos de pesquisas laboratoriais e de campo que evidenciavam melhorias significativas no desempenho de misturas, decorrentes da adição de cal hidratada: citavam-se o aumento do módulo de resiliência de forma associada, da resistência à deformação permanente, o retardamento do envelhecimento do ligante asfáltico, além do aumento à resistência ao dano por umidade induzida. Mais ainda, mencionava-se que embora houvesse poucos estudos a respeito, o aumento da resistência à deformação permanente se dava sem prejuízo de vida de fadiga. Constatava-se, globalmente, que a cal proporcionava melhorias semelhantes às causadas por polímeros e também que a incorporação de cal a ligantes modificados melhorava ainda mais o desempenho das misturas com ligantes polimerizados.

No Brasil, o emprego da cal na elaboração de concretos asfálticos é prática usual, mas até poucos anos atrás entendia-se que a cal desempenhava unicamente duas funções; como fíler e como melhorador de adesividade ligante-agregado.

No LAPAV/UFRGS, os relatos da experiência estadunidense, brilhantemente sintetizados por Little, Sebaaly e Epps (2001) e Little e Sebaaly (2006), suscitam a realização dos primeiros estudos, narrados por Núñez et al (2007). No primeiro estudo mostrou-se que o módulo de resiliência, a resistência à tração e a resistência ao dano por umidade induzida de um concreto asfáltico elaborado com ligante convencional e agregados de granito foram fortemente majorados com a incorporação de 1% de cal, mas que os resultados eram dependentes da pureza da cal.

Na virada da década, a pesquisa foi retomada, agora de forma mais abrangente. Em sua dissertação de mestrado, Bock (2012) apresentou uma ampla gama de resultados laboratoriais sobre as melhorias advindas da adição de cales (calcítica e dolomítica) em concretos asfálticos elaborados com ligantes convencional e modificado e agregados de basalto.

Dando prosseguimento ao estudo, nesta dissertação apresentaram-se e analisaram-se resultados de ensaios de fadiga, considerando as mesmas misturas dosadas e analisadas por Bock (2012).

1.1 OBJETIVOS

Complementarmente estudos realizados por Bock (2012), a pesquisa relatada nesta dissertação teve por objetivo principal avaliar os efeitos na vida de fadiga devidos à incorporação de cal em concretos asfálticos elaborados com agregado de basalto.

Para tal, foram propostos os seguintes objetivos específicos:

- a) Analisar e quantificar o efeito dos tipos de cal adicionada na vida de fadiga das misturas estudadas, bem como a interação com os ligantes e agregados utilizados nesta pesquisa, e;
- b) Obter um modelo composto que relacione a vida de fadiga com a deformação na fibra inferior da camada asfáltica e o módulo de resiliência das misturas estudadas.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Na revisão bibliográfica será discorrido sobre os temas que envolvem a dissertação. Como o foco da dissertação foi o estudo do trincamento por fadiga, se discorreu exaustivamente sobre o tema, como: equipamentos, tipos de ensaios, os problemas que o envolvem os ensaios e modelos de previsão de vida de fadiga. Na sequencia foram apresentados os resultados obtidos por Bock (2012) pelo fato deste estudo ser complementar a esta dissertação. Também foi apresentada uma breve revisão sobre materiais para execução de misturas asfálticas, os efeitos da cal em propriedades mecânicas das misturas asfálticas.

2.1 TRINCAMENTO POR FADIGA

As cargas cíclicas produzem falhas nos materiais para tensões menores do que aquelas obtidas na sua ruptura. Este é um fenômeno não-linear que ocorre em pavimentos, no qual o dano produzido no primeiro ciclo é diferente do dano produzido em cada ciclo seguinte. Este fenômeno é conhecido como fadiga e pode ocorrer por meio de ações mecânicas e/ou térmicas que não são críticas por si só, como no caso de um carregamento monotônico. A caracterização do dano por fadiga em misturas asfálticas é uma tarefa complexa devido a: natureza heterogênea do material, granulometria dos agregados, variação da espessura do filme de ligante, distribuição dos vazios, e natureza viscoelastoplástica do material (Balbo, 2000; Kim et al., 2002).

Existem na literatura várias metodologias para a previsão deste comportamento utilizando:

- a) Valores de tensão ou deformação;
- b) Energia dissipada (Ghuzlan e Carpenter, 2000; Shen e Carpenter, 2007; Kim et al., 2002);
- c) Mecânica do contínuo;
- d) Mecânica da fratura (Lytton et al., 1993).

O ensaio laboratorial de vida de fadiga tradicionalmente realizado no Brasil para definição do número de golpes de carga é feito por compressão diametral à tensão controlada (TC) (Specht, 2004; Brito, 2006; Rohde, 2007), sendo a carga numa frequência de 1 Hz aplicada através de equipamento pneumático (Pinto, 1991; Ceratti, 1991; Rodrigues, 1991). O ensaio em compressão diametral gera um estado biaxial de tensão em um corpo de prova

cilíndrico Marshall convencional. Detalhes da distribuição de tensões e deformações neste ensaio, inclusive levando em consideração a presença do friso de carga, são discutidos em Falcão e Soares (2002). No decorrer do ensaio de fadiga, a deformação de tração aumenta até o rompimento completo da amostra. Este tipo de ensaio é compatível com a caracterização de materiais de revestimentos asfálticos mais espessos em decorrência da predominância de absorção das tensões pelo revestimento com relação às camadas subjacentes (Pinto, 1991; Huang, 1993). Para a determinação da vida de fadiga pode-se realizar o ensaio em corpos-de-prova de diferentes geometrias.



Figura 1: Equipamento para ensaio de fadiga em amostra trapezoidal



Figura 2: Equipamento para ensaios de fadiga em amostra diametral



Figura 3: Equipamento para ensaios de fadiga em vigota (configuração quatro pontos)

Observa-se que o ensaio de fadiga à tensão controlada (TC) considera a tensão solicitante no corpo-de-prova como constante, o que é apenas uma aproximação, uma vez que o carregamento constante ao longo do ensaio não é traduzido em uma tensão solicitante constante. As tensões no corpo-de-prova, que podem ser calculadas por meio de expressões da elasticidade, admitem que o corpo-de-prova seja constituído de material elástico, isotrópico e sem dano. Isto é uma aproximação durante o ensaio de fadiga, uma vez que à medida que o carregamento é repetido, há dano progressivo no corpo-de-prova, além do fato de que as misturas asfálticas não são materiais puramente elásticos (Soares, 2009).

No caso de ensaio à deformação controlada (DC), a simulação corresponde a revestimentos mais delgados uma vez que nestes há maior contribuição das subcamadas na absorção das tensões solicitantes. Segundo Huang (1993), em revestimentos com espessuras inferiores a 5 cm, não acontece um decréscimo suficiente na rigidez, quantificada pelo módulo de rigidez por flexão (S_0) (SHRP, 1994), de modo a causar uma variação no nível de deformação durante o carregamento. Neste ensaio, a deformação é mantida constante enquanto que a tensão inicial no corpo de prova diminui até o fim do ensaio. Alguns autores admitem que o limite de ruptura aconteça quando ocorre a redução em 50% do S_0 inicial da mistura (Tayebali et al., 1993).

Embora ainda não normatizado no Brasil, o ensaio de fadiga tem sido largamente realizado, geralmente à compressão diametral, sob tensão e temperatura controladas. Utiliza-

se uma frequência de 1 Hz (Hertz) (60 aplicações por minuto com 0,1s (segundo) de duração do carregamento repetido e 0,9s de tempo de repouso). Para manter a temperatura controlada utiliza-se uma câmara com sistemas de aquecimento e refrigeração ligados a um termostato. Para cada mistura ensaiada determinam-se as relações entre o número de repetições à ruptura e o nível de tensões atuantes.

No método mecanístico de dimensionamento de pavimentos usado em Motta (1991) e Benevides (2000), a diferença de tensões de compressão e tração na fibra inferior do revestimento ($\Delta\sigma$) é considerada o principal fator desencadeador do trincamento por fadiga do revestimento no pavimento em campo, quando se trata de utilizar como critério, os resultados de laboratório obtidos com ensaios à TC em compressão diametral. As tensões calculadas através de um programa computacional servem de entrada de dados nas curvas de fadiga geradas a partir do número de golpes de carga até a ruptura para diversos níveis de $\Delta\sigma$. Relaciona-se então o número N determinado a partir do tráfego previsto com o número de golpes em laboratório por um fator laboratório-campo (FLC), fator este que possui extrema importância em ser utilizado.

Pinto (1991) mostrou diferenças importantes entre FLC para ensaios a flexão e a compressão diametral, em função da porcentagem de área trincada que se admite ao final da vida do pavimento, e ainda questões ligadas ao tempo de aplicação da carga e à frequência. Um FLC é extremamente importante, pois outros fatores não são plenamente considerados nos ensaios. Pode-se ressaltar a não consideração do envelhecimento da mistura e da progressão do dano no material durante o ensaio, além de aspectos presentes no campo não simulados em laboratório como variação térmica, presença de cargas estocásticas e a ocorrência do fenômeno de recuperação de trincas em virtude da ausência de cargas em alguns períodos (Rodrigues, 1991; Balbo, 2000).

Em misturas asfálticas, deve se diferir vida de fratura (N_f) de vida de serviço (N_s). A primeira se refere ao número total de aplicações de certa carga necessária à fratura completa da amostra e a segunda (N_s) ao número total de aplicações desta mesma carga que reduza o desempenho ou a rigidez inicial da amostra a um nível pré-estabelecido. Em geral, existe uma falta de consenso com relação ao tipo de teste, ao modo de carregamento, e ao método de análise que deve ser usado para a caracterização de misturas asfálticas com relação à fadiga (Soares, 2009).

De acordo com Carpenter et al. (2003), o limite de ruptura no concreto betuminoso usinado a quente (CBUQ) deve ser o correspondente àquele quando a mistura começa a apresentar as primeiras microtrincas. Os mesmos autores observaram que para níveis de

deformação de tração inferiores a 70 microstrain, a vida de fadiga de um CBUQ não é afetada e, portanto, a mistura resiste ao trincamento por fadiga durante o período de projeto.

Muitos estudos vêm sendo realizados com o objetivo de avaliar o momento em que a mistura começa a perder de forma acelerada sua rigidez, ou seja, a mistura atinge um limite a partir do qual será iniciado o processo acelerado do dano (Ghuzlan e Carpenter, 2000; Carpenter et al., 2003). Estes estudos geralmente consideram ensaios à DC. Há ainda diversos estudos sobre evolução do dano realizados em outras formas de ensaios de fadiga ou até outras interpretações do surgimento e crescimento das trincas (Pinto, 1991; Rodrigues, 1991; Tayebali et al, 1993, Braz, 1997). Dentre eles, o ensaio por flexão de viga com aplicação de carga no centro do corpo de prova é o mais usado no estabelecimento de critérios de ruptura.

Durante os primeiros ensaios de fadiga realizados no Brasil, costumava-se fazer a medida das deformações elásticas e plásticas durante todo o ensaio à TC. Depois que ocorreram quebras dos LVDT's (Linear Variable Diferencial Transducers) durante estas medições, foi feita a opção por não mais se fazer leituras ao longo do ensaio por medida de economia, dados os custos instrumentais de medida. Pinto (1991) mostrou com estas leituras que existe uma fase inicial dos ensaios de fadiga que ele denominou de "fase de condicionamento" que corresponde a menos de 5% da vida do corpo de prova. Nesta fase há um crescimento das deformações permanentes com alguma intensidade, sendo seguida de uma fase "estável" que corresponde a aproximadamente 70% da vida de fadiga e se caracteriza pelo surgimento da primeira trinca visível na parte externa dos corpos de prova. Em seguida começa a fase de "ruptura" propriamente dita, que corresponde a 25% da vida de fadiga e se caracteriza por um crescimento acelerado das deformações elásticas e plásticas e a ruptura total dos corpos de prova.

O ensaio de fadiga tem sido usado mais comumente para fins de comparação entre misturas. Contudo, mesmo neste caso, é preciso cautela para uma conclusão direta somente a partir das curvas, pois o estado de tensões gerados em cada caso depende da estrutura e do valor do Módulo de Resiliência (MR) de cada material (Motta, 1991; Pinto, 1991; Medina e Motta, 2005). Há uma tendência de se considerar a curva de maior k como a de maior vida de fadiga, o que seria válido somente se o σ (ou $\Delta\sigma$) gerado fosse o mesmo. Esta condição de maiores k's neste tipo de ensaio quase sempre está associada a maiores MR's na mistura asfáltica em relação às misturas com menores MR's. Mas misturas com maiores MR's também absorvem mais tensões numa estrutura de pavimentos e, portanto, não serão os mesmos níveis de tensão de tração de comparação.

No Brasil, a vida de fadiga de misturas em laboratório vem sendo investigada sobre tudo por meio de ensaios de carga repetida, como os aqui já mencionados. Vale observar que há também ensaios de carregamento monotônico que podem ser usados. Especificamente, se menciona aqui o trabalho de Kim et al. (2002) com o chamado ensaio de energia de fratura (fracture energy test). Este é realizado em corpos-de-prova de 100mm de diâmetro extraídos dos corpos-de-prova de 150mm confeccionados no compactador giratório. O ensaio é realizado à tração indireta a uma taxa de carregamento de 0,833mm/s. Com LVDT's posicionados ao centro do corpo-de-prova, a curva de tensão e deformação é obtida. A área sob esta curva, na parte de carregamento é definida como a energia de fratura, que por sua vez é definida como a soma da energia de deformação e da energia dissipada devido a mudanças estruturais. Os referidos autores apresentam boas correlações deste ensaio com trincamento em campo.

Algumas técnicas de ensaio aplicadas em pesquisas brasileiras são indicadas de maneira sucinta na sequência.

2.1.1 Tipos de ensaios de fadiga

Dentro dos estudos que compreenderam o programa Strategic Highway Research Program (Tayebali et al., 1993), estudos laboratoriais sobre fadiga de misturas asfálticas permitiram conferir que, para amostras de material idêntico, porém corpos-de-prova moldados de modo diverso e ensaiados à fadiga por meio de equipamentos diferentes, o número de ciclos à fadiga suportados pelo material resultava significativamente diferente caso a caso. Tomando-se como referência resultados de ensaios de fadiga realizados por meio do splittest, ensaios com trapézios em flexão resultaram em aplicações de carga de 1,5 a 3 vezes superiores para fadiga e ensaios em flexão com dois cutelos resultaram em 15 a 40 vezes mais aplicações de carga para fadiga, mantidos níveis de deformação crítica semelhantes.

2.1.1.1 Ensaios com Vigotas em Flexão

Trata-se de uma forma de ensaio mais amplamente empregada pela escola americana. O teste parte de um arranjo de um corpo de prova prismático, com uma dimensão predominante, partindo do esquema simples do ensaio de “dois cutelos” para a determinação da resistência à tração na flexão em uma zona com momento fletor constante (terço central).

Ceratti (1991), Pinto (1991) e Trichês (1993) empregaram este arranjo. E Colpo (2014) produziu os primeiros resultados deste tipo de ensaio no LAPAV/UFRGS em sua dissertação de mestrado.

A força é aplicada verticalmente nos dois terços do comprimento da vigota e sua aplicação poderá ser em um sentido (apenas descendente, sendo o material aliviado de sua ação durante sua recuperação elástica, quando cessada a força aplicada) ou em ambos os sentidos de uma mesma direção (neste caso, no retorno do ciclo de aplicação a força é aplicada no sentido ascensional). No segundo caso descrito o ensaio é por vezes denominado por ensaio de “flexão alternada” posto que, de modo alternado, faces inferior e superior da vigota serão submetidas a esforços de tração (na flexão).

A aplicação de forças em um sentido exclusivo é uma técnica empregada para os concretos de cimento Portland (CCP) ou para misturas tratadas com aglomerantes hidráulicos que apresentem rigidez elevada (módulo de deformação mais próximo de um CCP). O segundo modo de aplicação dos esforços é empregado ao caso de materiais que apresentem, durante o ensaio, uma parcela de deformação viscoelástica que necessita forçosamente ser recuperada imediatamente dadas as frequências típicas de aplicação de cargas durante os ensaios (geralmente de no mínimo 5 Hz), como no caso de materiais mais dúcteis como as misturas asfálticas e os solos melhorados ou tratados com aglomerantes hidráulicos.

Ainda no caso de ensaios de flexão alternada, ressalta-se a necessidade de estrito controle dos níveis de deformação sofridos pelo material que servirão de base à elaboração de modelos de fadiga do tipo “deformação constante”. No caso de materiais frágeis, o nível de deformação à ruptura é tão pequeno que se dá preferência a ensaios ditos de tensão controlada que resultam em modelos à “tensão constante”; isto é também tomado como técnica uma vez que materiais mais frágeis não apresentam uma degradação paulatina de seus parâmetros elásticos, como o módulo de deformação, ao longo do ensaio, sendo a ruptura associada a um aumento brusco da deformação momentos antes da fratura observada ao final do teste (Balbo, 2000).

Para misturas asfálticas estes ensaios são conduzidos com frequência de aplicação de carga de 1 a 5 Hz, sendo possíveis aplicações menos espaçadas no caso dos materiais de maior rigidez. Note-se tratar o ensaio de um teste uniaxial, ou seja, dada uma direção predominante na forma da amostra, avalia-se apenas os efeitos dos esforços de flexão nesta direção mais solicitada. Com materiais frágeis a fratura ocorre normalmente no terço médio da amostra, na seção vertical menos resistente (Balbo, 2000).

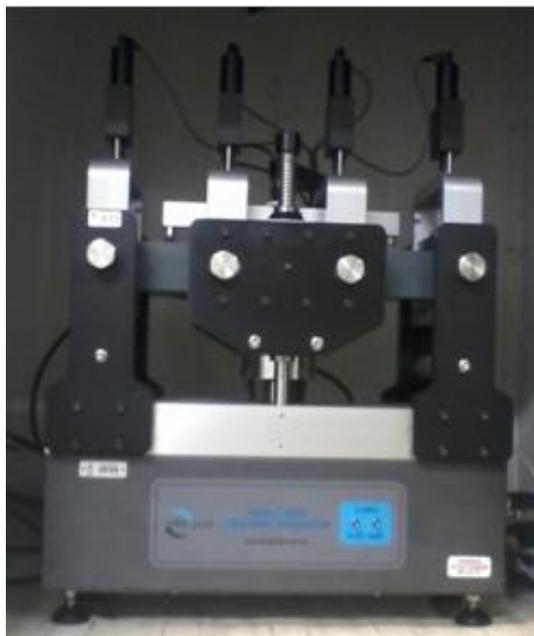


Figura 4: Equipamento para ensaio com vigota em flexão

2.1.1.2 Ensaio com Amostras Cilíndricas em Torção

Neste caso, mais abordado no passado pela escola britânica, a amostra cilíndrica é submetida a esforços de torção, compostos por ciclos de aplicação harmonicamente opostos, criando zonas de tração e de compressão em uma seção circular da amostra. Os ensaios são realizados com frequências geralmente superiores a 10 Hz, estabelecendo-se um padrão de deformação que é controlado ao longo do ensaio, gerando novamente estados de tensões uniaxiais. A ruptura de materiais frágeis neste tipo de ensaio ocorre em sua seção mais fraca (Balbo, 2000).

2.1.1.3 Ensaio de Tração Uniaxial

Amostras cilíndricas ou prismáticas (cúbicas) podem ser submetidas a ensaios cíclicos de tração direta, que podem ser realizados tanto a baixas como altas frequências (> 25 Hz). Impõe-se, novamente para este caso, um estado de tensões uniaxial, sendo que a fratura de materiais frágeis se daria na seção transversal mais fraca da amostra. O nível de deformação possível para um material mais dúctil submetido a este tipo de ensaio seria controlado por ciclos alternados de tração-compressão da amostra (Balbo, 2000).

2.1.1.4 Ensaio de Tração Indireta

Também conhecido por ensaio dinâmico de compressão diametral, o arranjo permite a criação de uma zona tracionada que coincide com o plano de aplicação de cargas, sendo, portanto a zona de fratura (quando for o caso) definida a priori neste tipo de teste. Os testes são realizados em níveis de frequência de baixo a médio (10-15 Hz) sendo a amostra cilíndrica neste caso submetida a um estado de tensões biaxial, sendo que seções verticais da amostra ficam sujeitas a esforços de compressão e seções horizontais, por sua vez, a esforços de tração. Observe-se que durante tal tipo de ensaio, os materiais mais dúcteis apresentarão deformações permanentes progressivas, mesmo porque não há uma alternância de esforços para uma compensação da deformação viscoelástica durante cada ciclo de aplicação de cargas (Balbo, 2000). Specht (2004), Brito (2006) e Rohde (2007) empregaram tal arranjo para seus testes.



Figura 5: Equipamento para ensaio de fadiga por tração indireta

2.1.1.5 Ensaio de Flexão em Amostras Trapezoidais

A escola francesa desenvolveu um equipamento eletromagnético para a execução de ensaios de fadiga, sobretudo à deformação controlada, com emprego de corpos de prova com formato trapezoidal. Este ensaio é normalizado pela norma francesa NF P 98-261-1. Neste caso ocorre a aplicação de força (deslocamento) na extremidade de menor seção da amostra

enquanto a extremidade oposta encontra-se engastada em uma base, com auxílio de resina epóxica. O ensaio simula esforços de flexão na amostra, sendo facilmente controlada a deformação elástica aplicada, trabalhando em flexão alternada para a recuperação da deformação rapidamente no caso de ensaios com misturas asfálticas. O ensaio é realizado a temperatura de 10°C e frequência de 25 Hz, correspondendo às condições médias em que os pavimentos são solicitados (Magalhães, 2004).

Magalhães (2004) explica o procedimento do ensaio: O ensaio prossegue até que a rigidez inicial tenha sido reduzida à metade, considerado essa redução do módulo como critério de ruptura. A curva de fadiga é determinada a partir da execução do ensaio em três níveis de deformação, com seis corpos de prova por nível. A deformação admissível considerada como valor característico do comportamento da mistura, corresponde a 1 milhão de ciclos. As normas especificam um valor mínimo para misturas com papel estrutural conforme a classe de desempenho.

2.2 EQUIPAMENTOS PARA ENSAIOS

Basicamente, os tipos de equipamentos para ensaios de fadiga podem ser divididos em três grupos: pneumáticos, hidráulicos e eletromagnéticos. A precisão de um ensaio de fadiga em si mesma será bastante variável em função do tipo de equipamento empregado. Observe-se, por exemplo, o caso de um material estabilizado com cimento. O material, de natureza frágil, deverá ser testado à fadiga com equipamento empregando amplitudes de deformação baixas; por exemplo, se a tensão induzida pela aplicação de carga é de 1 MPa, e o concreto compactado apresenta módulo de deformação de 24.000 MPa, a deformação sofrida será de 42×10^{-6} mm/mm, à qual deverá ser sensível o sistema de leituras de deformações.

Equipamentos Pneumáticos foram aqueles mais amplamente empregados em pesquisas acadêmicas no Brasil publicadas até 1991. Nessas máquinas, geralmente montadas de maneira artesanal, e disponíveis em vários laboratórios de pesquisa, os esforços aplicados nas amostras ensaiadas são gerados por meio de equipamento compressor de ar acoplado a válvula de pressão e pistão. Tais equipamentos oferecem enormes desvantagens, dentre as mesmas, a quase incontrolável perda de carga no sistema de transmissão do ar comprimido durante o ensaio, o que torna a constância da carga ou pressão aplicada algo fora de controle, levando a níveis de precisão muitas vezes inaceitáveis.

Além disso, tais equipamentos, por sua natureza, trabalham a frequências muito baixas. Para se ter uma idéia de como a frequência é significativa na elaboração de um ensaio, se desejássemos uma aplicação de um milhão de repetições de carga, a uma frequência de 1 Hz, o teste levaria quase 12 dias ininterruptos, o que provavelmente só por tal tempo de teste (desconsiderando as necessárias interrupções ao longo dos testes) tornasse inviável os trabalhos, já que muitas e muitas amostras devem ser ensaiadas para se garantir um nível de precisão adequado no modelo estatístico a ser posteriormente definido.

Os equipamentos com pistão acionado hidraulicamente para a aplicação de cargas permitem um controle bem mais preciso além de permitirem a elaboração de testes com frequências de aplicação de carga mais elevadas, como de 10 a 50 Hz. Neste caso, confrontando com o exemplo anterior de duração do teste, teríamos o ensaio com um milhão de ciclos de carregamento completado após cerca de 28 horas ininterruptas de trabalho. Tal tipo de máquina de teste é realizado como, por exemplo, com uma prensa americana MTS (Material test system) (Figura 6). Ocorre que, ainda oferecendo precisão incomparável àquela dos equipamentos pneumáticos, o curso (deslocamento) do pistão pode ser afetado pela viscosidade do óleo, o que resultaria desfavorável para pequenos deslocamentos, em especial para ensaios conduzidos com aplicação de carga senoidal. Em todo o caso, o emprego de equipamentos hidráulicos (servo-controlados) permite atingir precisão muito mais compatível para o tipo de problema em questão.



Figura 6:Prensa MTS

Em equipamentos magnéticos, a força (ou deslocamento) é aplicada por ação de um motor elétrico associado a uma “manivela” circular cujo pino está acoplado a um sistema de aplicação do deslocamento no corpo de prova. O movimento giratório da manivela impõe uma aplicação senoidal de carga em movimento harmônico simples (alternância de tração e compressão). Este tipo de equipamento não está sujeito aos efeitos já descritos para os equipamentos hidráulicos durante os testes, sendo os mais aptos para ensaios com baixos valores de deformação. No entanto, a acessibilidade a equipamentos dessa natureza é muito limitada e seus custos são elevados.

2.2.1 Problemas relacionados aos ensaios de fadiga

Balbo (2000) apresentou um resumo dos problemas relacionados aos ensaios de fadiga, os quais são apresentados na sequência:

a) Carregamento

Ao observarmos os veículos rodoviários de interesse à análise mecanicista de pavimentos, verificamos sua grande diversidade em termos de tipos de eixos, de distância entre eixos isolados, tamanhos de pneumáticos, dentre outros, que naturalmente nos levam a acreditar que cada carga aplicada exerce pressões diferentes resultando em estados de tensão diferentes nas camadas dos pavimentos.

Um dos fatores mais simples que causam diferenças notáveis entre os ensaios de fadiga e a forma de aplicação de cargas em campo é a variabilidade do carregamento. Realizamos os ensaios a um nível de deformação ou tensão controlada. No primeiro caso, implica que de tempos em tempos, para o caso de materiais dúcteis, necessitamos reduzir a carga aplicada para manter constante o nível de deformação que ocorre no material. No segundo caso, mantemos a tensão constante ao longo de todo o ensaio. Isto nos conduz para o fato de que a aplicação de cargas durante o ensaio é incompatível com a realidade de campo, pois a carga ou é constante ou decresce entre patamares constantes.

Ainda quanto à carga aplicada, poderíamos numa hipótese de cálculo considerá-la constante, porém, a pressão aplicada por cada roda de veículo certamente não seria constante. Como encarar tal realidade durante os ensaios? Tomando-se como dogma, poderíamos dizer

que as cargas e pressões aplicadas em campo possuem uma variabilidade muito grande, não seguindo regra alguma que fosse ao longo do ciclo de vida da estrutura de pavimento.

Note-se ainda o outro fato: a forma geométrica da carga aplicada em campo e a forma da carga aplicada em laboratório, para qualquer um dos ensaios descritos anteriormente, não teriam relação alguma. Contudo, ainda há uma terceira consideração quanto ao carregamento.

Os veículos, ao se deslocarem na faixa de rolamento pela qual transitam, apresentam um deslocamento lateral aleatório, chegando a atingir 300 mm em rodovias de tráfego pesado. Embora importantes a ponto de serem levados em consideração durante avaliações de desempenho em pistas experimentais, tais deslocamentos laterais são negligenciados no dimensionamento dos pavimentos, adotando-se o fluxo canalizado para rodovias e vias urbanas. O fato de eixos se deslocarem do ponto admitido para a análise resulta, na realidade, diferenças de solicitações no ponto de análise, em especial, quando nos referimos a análises elásticas para a verificação à fadiga de um dado material no pavimento.

b) Frequência

Um aspecto crucial a ser recordado é a questão da frequência da aplicação de cargas em campo, a qual apresenta dicotomia muito grande entre campo e laboratório. Dois aspectos devem ser recordados neste ponto. A maior distância entre tempo de ocorrência de passagens de carga em campo favorece o fenômeno de autorreparação do concreto asfáltico, por exemplo, enquanto em laboratório tal possibilidade seria descartada em ensaios de amplitude e frequência contínua. O segundo aspecto é que aplicar frequência de 1 Hz, para exemplificar, inviabilizaria, por inúmeras razões, os ensaios de fadiga.

c) Tempo de aplicação da carga

Uma questão ainda importante quanto ao carregamento é sua forma ao longo do tempo de aplicação.

Pavimentos são submetidos a esforços de amplitude variável entre tração e compressão, com maior magnitude em tração, com a passagem da carga (um ponto de análise é primeiramente comprimido até um pico para rapidamente saltar à condição de tracionado, e logo após o pico da carga, é novamente comprimido até que se recupere elasticamente).

Há, portanto, entre cargas, um tempo de relaxação para os materiais. O ideal, face ao exposto, seria que um ensaio de laboratório fosse programado para ocorrer por impulsos (ocorrendo tempo de relaxação após a aplicação da carga), com amplitude de sinal entre tração e compressão variável, e finalmente que ainda fosse descontínuo entre sequências de amplitude variável aplicada, de modo a simular a passagem de cargas de um mesmo veículo com magnitudes e pressões de contato diferentes. Porém, está-se longe de uma situação como a descrita por razões operacionais, de custo e tempo, precisão de equipamentos, etc.

Em resumo, fica evidente que a forma como cargas aplicadas em campo, tanto em magnitudes quanto ao posicionamento e forma das solicitações, não são representadas de forma válida nos ensaios normalmente realizados em laboratório.

d) Amostras de Ensaio

A preparação de amostras para ensaio de fadiga em laboratório, face à dispersão típica de tais testes que gera uma necessidade de ensaio de grande número de corpos de prova, tem como regra básica a homogeneidade das amostras. Preocupações dessa natureza são evidentes nos trabalhos de diversos pesquisadores.

Os testes são, via de regra, conduzidos com misturas asfálticas moldadas em laboratório. No caso de amostras cilíndricas, o material pode ser compactado por impacto (Marshall) ou por amassamento (Superpave), se da primeira maneira, não traduz o que ocorreria em campo, o que já se torna um grau de liberdade fora de controle no processo. As amostras compactadas com emprego de soquete podem apresentar diferenças de densidade em sua profundidade que irão interferir nos resultados dos ensaios.

Em campo, muitos fatores concorrem para que não exista uma homogeneidade tão grande no material, conforme mencionado inicialmente, após sua compactação. Variações em processos de usinagem do material dia após dia, variações entre qualidade de materiais de fornecedores distintos, segregação da mistura entre usinagem e espalhamento em campo, compactação variável em campo; todos estes são fatores indicativos de uma grande heterogeneidade no material aplicado em campo. Portanto, as exigências laboratoriais para os ensaios de fadiga levam a uma homogeneidade que não reflete as condições de campo uma vez que os materiais em pista raramente atingirão suas potenciais propriedades mecânicas ideais.

e) Temperatura de Ensaio

Muitos materiais de pavimentação são ditos termosuscetíveis e estão sujeitos a variações de temperatura em condições de campo; tais variações induzem a comportamento muito diferenciado em relação a uma temperatura de referência, seja por alteração de suas características de deformação (como no caso de concretos asfálticos) ou por indução de tensões de empenamento (no caso do concreto).

Abordemos inicialmente o caso dos materiais termosuscetíveis. Misturas asfálticas trabalham, em condições de campo, por exemplo, em um meio de manhã de inverno no Estado de São Paulo, com temperatura do ar de 25°C e sem vento frio, a temperaturas de 40°C apenas por irradiação solar.

No Brasil, durante o verão tais temperaturas atingem picos de 55 a 65°C. Uma faixa de variação de temperatura de misturas asfálticas, ao longo de um ano, poderia ser tomada como sendo entre 10°C e 60°C. Em regiões de clima temperado, tais temperaturas de trabalho de misturas asfálticas se encaixariam em uma faixa entre -25°C e 55°C. Ora, ensaios de fadiga com misturas asfálticas em temperaturas superiores a 30 ou 35°C são notoriamente inexequíveis, pois, as amostras de pequena dimensão e sem nenhum confinamento lateral e de suporte acabam sofrendo fluência tão grande de modo a inviabilizar o teste logo no princípio das aplicações de carga. Assim, é comum a elaboração de testes de fadiga a 25°C (no Brasil) com misturas asfálticas, 10°C é uma prática de pesquisadores europeus.

Além do aspecto da temperatura ambiente para o ensaio, deve ser recordado que durante o ensaio há aquecimento da amostra por atrito interno de suas partículas; mesmo estando controlada a temperatura externa, no interior da amostra ocorrem temperaturas que não são registradas ou controladas, não se tendo, portanto um resultado referenciado à temperatura da amostra e sim à temperatura no ambiente do teste. Recorde-se que no campo, ao longo de sua vida de serviço, um revestimento asfáltico trabalha com temperaturas diferentes ao longo de um mesmo dia e de um ano, o que não é reproduzível no ensaio em laboratório.

No caso de concretos de cimento Portland a questão de controle de temperatura se dá pelo fato de que a indução de gradientes térmicos em placas de concreto implica na ocorrência de tensões mesmo na ausência de carregamentos, o que não foi considerado para os experimentos geradores da grande maioria de modelos de fadiga encontrados na literatura.

Temos assim como fato que os testes de fadiga com misturas asfálticas são conduzidos a temperaturas fora da realidade de campo, até mesmo por dificuldades tecnológicas do

ensaio; para os concretos seria conveniente a aplicação de amplitudes mínimas de tensões de tração na flexão que representassem as condições de campo devidas exclusivamente ao empenamento ocorrido.

f) Paralisação do Ensaio

O processo de fadiga em um material é percebido pela manifestação de fratura em sua estrutura visível; assim dizemos que ocorreu quando em campo observamos ou fissuras incipientes ou interligadas do tipo couro de crocodilo. Em um ensaio de fadiga com material dúctil, ao longo dos ciclos de solitação a amostra vai apresentando fluência e, portanto, deformando-se. Geralmente, o critério de parada do ensaio é tido como sendo o momento em que a força aplicada é 50% da força inicial do ensaio ou quando o módulo resiliente atinge valor de 50% de seu valor inicial. Como se percebe, não há um critério de parada baseado na ocorrência de fratura da amostra.

Além disso, é preciso recordar que em campo, o módulo resiliente da mistura asfáltica não decresce de imediato ao longo do tempo. Devido à paulatina oxidação do ligante asfáltico, o módulo resiliente, a menos de variações diárias de temperatura na mistura, aumenta, tornando a mistura menos dúctil e mais quebradiça, portanto mais propensa à ocorrência de fraturas. Nestas condições, o ensaio torna-se muito restritivo quanto ao desempenho em pista.

2.3 PREVISÃO DE VIDA E DE DANO POR FADIGA

Neste capítulo será apresentada uma revisão sobre os mais diversos modelos de previsão de vida de fadiga. Esta revisão se baseou no trabalho de Pud Baburamani (1997) intitulado como “Asphalt fatigue life prediction models – a literature review, Research Report ARR 334”, logo, as referências citadas neste subcapítulo estão atreladas ao estudo deste autor.

Os danos físicos como a ruptura ou o trincamento observados no pavimento são função principalmente do estado de tensões, deformações ou deslocamentos induzidos pelo carregamento do tráfego e temperatura. De acordo com Finn et al (1977), o desenvolvimento de modelos de previsão do dano em pavimentos incluem os seguintes elementos:

a) Caracterização das propriedades do material em laboratório;

- b) Análise da resposta estrutural das camadas do pavimento;
- c) Desenvolvimento do critério de ruptura e modelos de previsão de dano cumulativo.

A vida de fadiga de um pavimento asfáltico pode ser definida como a magnitude de tráfego, expressa em número de equivalentes de eixo padrão, que ele pode suportar antes que o dano observado em termos de quantidade de trincas em uma determinada porcentagem de área de trilho de roda. O nível de trincamentos toleráveis pode variar dependendo dos carregamentos de tráfego projetado, e geralmente varia de 10% a 45%. Conseqüentemente, o fator laboratório-campo (shift factor) também varia dependendo do nível tolerável de trincas previstas no projeto do pavimento asfáltico.

Relações empíricas entre variáveis das misturas asfálticas, rigidez da mistura e da vida de fadiga tem sido desenvolvidas por inúmeros pesquisadores. Essas relações são específicas para as misturas locais consideradas, e os métodos de ensaio e condições utilizadas. A previsão do dano e do dano cumulativo devido à fadiga tem sido geralmente aplicada usando critérios de tensões de tração e de rigidez à flexão. Entretanto, em modelos de laboratório de previsão de vida de fadiga, as propriedades volumétricas da mistura e a energia dissipada ou parâmetros de mecânica da fratura tem sido incorporados. Em ambos os casos, fatores laboratório-campo têm sido introduzidos para prever o nível de trincas por fadiga ou danos no campo.

Diversos modelos de previsão de vida de fadiga de laboratório, baseados em abordagens de deformação ou dissipação de energia tem sido desenvolvidos por diversos pesquisadores, por exemplo: Shell (1978), Bonnaure, Gravois e Udron (1980) e SHRP 1994. Esses modelos são baseados em diversas variáveis que influenciam a vida de fadiga do pavimento asfáltico como a deformação de tração, as propriedades volumétricas da mistura (volume de ligante – V_b , volume de vazios – V_a , e vazios preenchidos com ligante VFB), rigidez à flexão (S_{mix})₀, e o componente viscoso da rigidez à flexão.

Para a previsão do comportamento do concreto asfáltico em campo, o fator laboratório-campo, variando de 10 a 20, dependendo do nível de trincamento que pode ser tolerável, tem sido aplicado para modelos de previsão de vida de fadiga (SHRP 1994b). A diferença entre a vida de fadiga de pavimentos de laboratório e de campo é atribuída a diferenças de condições de carregamento, incluindo tipo de veículo e configuração do eixo, período de descanso entre os carregamentos, e fatores do ambiente como a variação da temperatura sazonal que ocorre no pavimento. Esse fator laboratório-campo é considerado

para também computar os efeitos de tensões residuais e recuperações, devidas à variação de temperatura, períodos de descanso, propagação de trincas e variação do trilho de roda.

Lytton et al (1993) sugeriram que o fator laboratório-campo consistisse em três componentes: recuperação, tensões residuais e dilatação resiliente. O fator laboratório-campo é composto pelo produto dos fatores laboratório-campo devido à: recuperação (variando entre 1 e 10), tensão residual compressiva e de tração (variando entre 0,3 e 3) e a dilatação resiliente, que depende do coeficiente de Poisson.

2.3.1 Previsão de vida de fadiga baseada na deformação

2.3.1.1 Modelos baseados na deformação da mistura

A magnitude da deformação de tração na fibra inferior das camadas do pavimento é o critério no qual as microtrincas, o início das trincas e a ruptura em bloco ou trincas ‘‘couro de jacaré’’ acredita-se que ocorra. Em laboratório, ensaios de fadiga são conduzidos a vários pré-determinados níveis de máxima tensão ou deformação na fibra extrema da viga, e a relação entre deformação e o número de ciclos da ruptura forma a base para se avaliar o comportamento à fadiga. A deformação inicial na vida de fadiga é o critério básico de comportamento do material que se considera ao se determinar a espessura da camada de asfalto no projeto estrutural de pavimentos.

A abordagem ‘‘deformação’’ é também conhecida como a abordagem fenomenológica. Na base desta abordagem para a previsão do comportamento do pavimento asfáltico em testes flexão repetida, a vida de fadiga das misturas pode ser expressa como uma função da deformação de tração aplicada em uma simples equação de regressão:

$$N_f = A (1/\epsilon_t)^b \quad (1)$$

Onde:

N_f = número de ciclos para a ruptura à fadiga em laboratório

ϵ_t = deformação de tração inicial, e

A e b são o intercepto e inclinação respectivamente, determinados pela regressão linear;

A relação é fundamental para qualquer modelo de previsão de vida de fadiga, bem como a deformação de tração nas camadas de asfalto determinar o número de repetições do tráfego permitidas, a qual depende da rigidez do revestimento. Entretanto, as constantes A e b na relação acima são específicas para misturas asfálticas.

O projeto e o critério de ruptura de pavimentos asfálticos têm sido desenvolvidos usando as relações de laboratório para fadiga, obtidas de uma variação de temperatura e de deformação dinâmica inicial. Diversas destas relações têm sido desenvolvidas de testes de laboratório. Dependendo do tipo de mistura e de condições de teste, o intercepto e a declividade têm valores diferentes.

A abordagem francesa para modelos de previsão de vida de fadiga é também baseada no critério de deformação de tração. Em 1990, um extenso programa de testes para avaliar o comportamento à fadiga de seis misturas asfálticas, incluiu misturas com alto módulo e foi desenvolvido usando o aparelho de teste circular LCPC de Nantes. As misturas de asfaltos também foram caracterizadas no laboratório com carregamentos de tensão e deformação controladas à diversas temperaturas e frequências (de La Roche et al (1994), de La Roche e Riviere (1997)). Desde as medidas de deflexão e curvaturas na seção de teste, até deformação equivalente para uma aplicação de carga foram calculadas (ϵ_{cal}). O tempo de vida de fadiga na estrutura do pavimento (número de ciclos até 50% de trincas na seção experimental) foi estimado levando em conta o comportamento à fadiga de misturas em laboratório, usando a seguinte relação de Odeon e Caroff (1997):

$$N = 106 \times (\epsilon_{cal}/k \times \epsilon_6(\theta))^{1/b} \quad (2)$$

N = duração da vida,

ϵ_{cal} = deformação calculada na estrutura para a passagem de um carregamento de eixo simples

k = fator laboratório-campo levando em conta a diferença entre vida de fadiga projetada e observada,

$\epsilon_6(\theta)$ = deformação à 10^6 repetições de carregamento à temperatura $\theta^\circ\text{C}$ no teste de laboratório

1/b = inclinação da curva de fadiga

2.3.1.2 Modelos baseados na deformação e rigidez da mistura

Como já discutido, idealmente as relações de previsão de vida de fadiga levam em conta os efeitos das propriedades volumétricas da mistura, temperatura, intervalo entre carregamentos, envelhecimento, recuperação, etc., na vida de fadiga. E como o asfalto é um material viscoelástico em temperaturas moderadas e entre o intervalo de carregamentos, a incorporação da rigidez da mistura nas equações de previsão de vida de fadiga absorvem os efeitos da temperatura e do intervalo entre carregamentos. A influência da rigidez do pavimento na tensão e deformação desenvolvidas na fibra inferior da camada tem sido amplamente reconhecida por inúmeros pesquisadores. Em uma revisão sobre as deflexões no pavimento e as informações sobre o seu comportamento, feito pela seção de testes em vias da AASHO, Kingham (1973) concluiu que tensões e deformações críticas horizontais na camada de asfalto (devido ao tráfego veicular) foram fortemente influenciadas pela rigidez do asfalto. A rigidez característica do asfalto também é influenciada pela temperatura e a proporção do carregamento tão bem quanto pela composição volumétrica da mistura. A resposta à fadiga de uma mistura asfáltica, para aplicação de carregamentos repetitivos em testes de laboratório pode ser expressa como uma relação generalizada, incorporando a aplicação de tensão e deformação da mistura, como sugerida por Monismith, Epps e Finn (1985) e outros, como se segue:

$$N_f = A (1/\epsilon_t)^b (1/S_{m\acute{a}x})^c \quad (3)$$

Onde:

N_f = número de ciclos de ruptura por fadiga em laboratório

ϵ_t = Deformação de tração

$S_{m\acute{a}x}$ = rigidez inicial da mistura, e

A, b e c = constantes de regressão

O modelo de previsão de ruptura por fadiga seguinte tem sido utilizado para prever níveis de trincamento observados no campo pela aplicação de fatores laboratório-campo para resultados de fadiga de laboratório (Finn et al, 1986):

$$N_f = K_1 \times (\epsilon)^{-K_2} \times (E)^{-K_3} \quad (4)$$

Onde:

N_f = número de ciclos para a primeira trinca

\mathcal{E} = máxima deformação de tração na fibra inferior do revestimento calculada

E = módulo complexo do revestimento

K_1, K_2, K_3 = constantes que dependem das propriedades do material

Um dos mais antigos modelos de previsão de ruptura por fadiga resultou do trabalho desenvolvido no NCHRP e AASHTO nos EUA. Modelos de trincamento por fadiga baseados em testes de laboratório e observações de campo em termos de porcentagem de área do trilho de roda trincada foi proposta por Finn et al (1977). Os dados de fadiga provenientes de laboratório usados no desenvolvimento de modelos de previsão vieram de Monismith e Epps (1969) e Monismith et al (1972) e a equação básica para a previsão do início do trincamento foi:

$$\text{Log } N_f = 14.82 - 3.291 \log (\mathcal{E}/10^{-6}) - 0.854 \log (S_{\text{máx}}/10^3) \quad (5)$$

A temperatura tem uma influência direta na rigidez à flexão inicial e na deformação inicial da vida de fadiga. Entretanto, o efeito da temperatura da vida de fadiga é fortemente influenciado pelo efeito da temperatura na rigidez inicial. Kong Kam Wa et al (1997) investigaram um modelo de regressão combinada incorporando temperatura e rigidez inicial, e foi visto que a rigidez inicial tem uma influência dominante na vida de fadiga. Eles recomendaram um modelo de regressão incorporando a rigidez inicial (S_0) e deformação inicial (\mathcal{E}) como mostrado abaixo:

$$\text{Log } N_f = 19.3068 - 4.7944 \log \mathcal{E} - 1.163 \log S_0 \quad (6)$$

De acordo com Craus, Yuce e Monismith (1984), a equação de previsão do trincamento por fadiga desenvolvida por Finn para o NCHRP baseou-se na análise observada do trincamento em seções de pavimento de 10 cm de espessura ou maiores. Para revestimentos asfálticos delgados (com menos de 10 cm de espessura), Craus et al, desenvolveram equações de previsão modificadas para menor ou igual a 10% e maior a 30% de área trincada utilizando dados do teste em estradas da AASHO, e as equações são mostradas abaixo:

$$\text{Log Nf (< 10\% de \u00e1rea trincada)} = 15.87 - 3.291 \log (\epsilon/10^{-6}) - 0.854 \log (E/10^3), \text{ com } (7)$$

fator laborat\u00f3rio-campo de 11.5

$$\text{Log Nf (> 30\% de \u00e1rea trincada)} = 15.988 - 3.291 \log (\epsilon/10^{-6}) - 0.854 \log (E/10^3), \text{ com } (8)$$

Fator laborat\u00f3rio-campo de 15.0

2.3.1.3 Modelos baseados na deforma\u00e7\u00e3o, rigidez e volume de ligante da mistura:

a) Geral

Teor de ligante, ou volume de ligante, \u00e9 o fator que mais afeta o comportamento \u00e0 fadiga de misturas asf\u00e1lticas por causa do seu efeito na rigidez da mistura. Misturas asf\u00e1lticas s\u00e3o por um sistema de tr\u00eas componentes: agregado, ligante e vazios. Para um dado volume de vazios, um teor mais baixo de ligante significa uma maior propor\u00e7\u00e3o de agregados e logo, uma maior rigidez da mistura.

O efeito do aumento no teor de ligante no comportamento \u00e0 fadiga depende da dura\u00e7\u00e3o do carregamento em ensaios de fadiga. Em ensaios com deforma\u00e7\u00e3o controlada, um maior teor de ligante \u00e9 esperado trazer resultados de uma maior vida de fadiga em um dado n\u00edvel de deforma\u00e7\u00f5es por causa da menor rigidez \u00e0 flex\u00e3o inicial da mistura com o maior teor de ligante. A deforma\u00e7\u00e3o de fadiga para um dado n\u00famero de ciclos se mostrar\u00e1 crescente com o teor de ligante (V_b) na mistura de acordo com a seguinte rela\u00e7\u00e3o que foi criada para uma rigidez da mistura de 5.000 MPa (Koole, Valkering e Stapel, 1989):

$$\epsilon_{\text{FAT}} (\text{\u00e0 } N = 10^6 \text{ ciclos}) = ((17.4 \times V_b) + 22) \times 10^{-6} \quad (9)$$

b) Modelo de Shell de previs\u00e3o de vida de fadiga

Fazendo uso de dados de ensaio de fadiga por tens\u00e3o controlada em v\u00e1rias misturas e rela\u00e7\u00f5es entre deforma\u00e7\u00e3o e vida de fadiga, entre deforma\u00e7\u00e3o e rigidez da mistura e entre deforma\u00e7\u00e3o e teor de ligante, uma rela\u00e7\u00e3o combinada dentre estas foi desenvolvida por Shell (1978):

$$\epsilon_{\text{FAT}} = ((0.856 \times V_b) + 1,08) \times (S_{\text{m\u00e1x}})^{-0,36} \times (N_{\text{FAT}})^{-0,2} \quad (10)$$

Este modelo de fadiga baseou-se nos ensaios laboratoriais de fadiga com deformação controlada e carregamento sinusoidal em treze misturas asfálticas típicas de vários países. Estas relações têm sido incorporadas como um nomograma no modelo de previsão de vida de fadiga de Shell (1978) e adotado no guia de projeto de pavimentos da Austroads (Austroads, 1992) para prever a vida de fadiga de pavimentos em campo. O modelo de vida de fadiga incorpora deformação, rigidez à flexão da mistura e teor de ligante, segue:

$$N_f = \left[\frac{6918 (0.856 X V_b + 1.08)}{S_{mix}^{0.36} X \mu\epsilon} \right]^5 \quad (11)$$

N_f = Número permitido de repetições do carregamento

$\mu\epsilon$ = Deformação de tração produzida pelo carregamento (em microstrain)

V_b = Teor de asfalto da mistura

$S_{m\acute{a}x}$ = Rigidez à flexão da mistura (MPa)

Para rigidez de ligante que exceda 10 MPa, a deformação prevista e medida permissível (ϵ_{FAT} e $N = 10^6$ ciclos) é geralmente entre $\pm 30\%$ (Valkering e Stapel, 1992).

Levando em conta as diferenças no carregamento e nas condições ambientais entre laboratório e campo, o fator de correção vida de fadiga de projeto de 10 a 20 vezes foi sugerido por para o modelo de Shell (van Dijk e Visser, n1977 e Shell, 1978). Para carregamento intermitente e considerando a recuperação o fator laboratório-campo foi de 2 a 10, e para distribuição transversal de trilho de roda, de 2,5. Uma redução na vida de fadiga de projeto de 1 a 3 foi atribuída para variação de temperatura nas camadas do pavimento (considerando médias anuais). Para uma temperatura de baixa a moderada foi atribuído um fator mais baixo, enquanto que para uma temperatura mais alta e pavimentos delgados, um fator mais alto foi aplicado. Um fator laboratório-campo de 10 foi incluído no programa computacional e no gráfico de projeto associado a esse modelo (Valkering e Stapel, 1992).

O fator laboratório-campo de Shell é semelhante ao dos modelos NCHRP ou do Asphalt Institute, embora os ensaios de laboratório deste modelos fossem conduzidos em diferentes condições de carregamentos (Shell foi em deformação controlada e o NCHRP foi em tensão controlada). O nível de trincamento associado ao fator laboratório-campo de Shell não é conhecido. Logo, não é claro que o modelo e o fator laboratório-campo foram calibrados ou validados com ensaios de campo ou observações do real dano por trincamento no campo.

2.3.1.4 Modelos baseados na deformação, rigidez e vazios da mistura preenchidos com ligante:

a) Geral:

A rigidez à flexão e a vida de fadiga do pavimento asfáltico são também influenciadas pelo teor de ligante (espessura do filme de ligante) e do nível de compactação (vazios com ar) alcançados pela mistura. Para uma mistura asfáltica com um teor de ligante alvo de 5% (em massa) e 5% de vazios com ar, uma queda de 1% no teor de ligante combinada com um aumento de 1% de volume de vazios resultaria em uma queda de 39% na vida de fadiga, bem como redução de 70% na vida de fadiga poderia ser esperada para a mesma queda no teor de ligante, mas com um aumento de 3% no volume de vazios (Harvey et al, 1995)

De maneira a demonstrar os efeitos do teor de ligante e do volume de vazios no comportamento à fadiga, um gráfico de deformação versus vida de fadiga para uma mistura Class 320 em dois diferentes teores de ligante e volume de vazios é demonstrada na figura 7. A mistura L4 tem 4,8% de ligante e 7,3% de volume de vazios, enquanto que a mistura L9 tem 6% de ligante e 3,2% de vazios. A mistura L9 (em cinza) mostrou melhor comportamento à fadiga do que L4 (em preto)(Baburamani, 1998). As misturas foram caracterizadas em ensaio contínuo haversine, à carregamento com deformação controlada e 20°C.

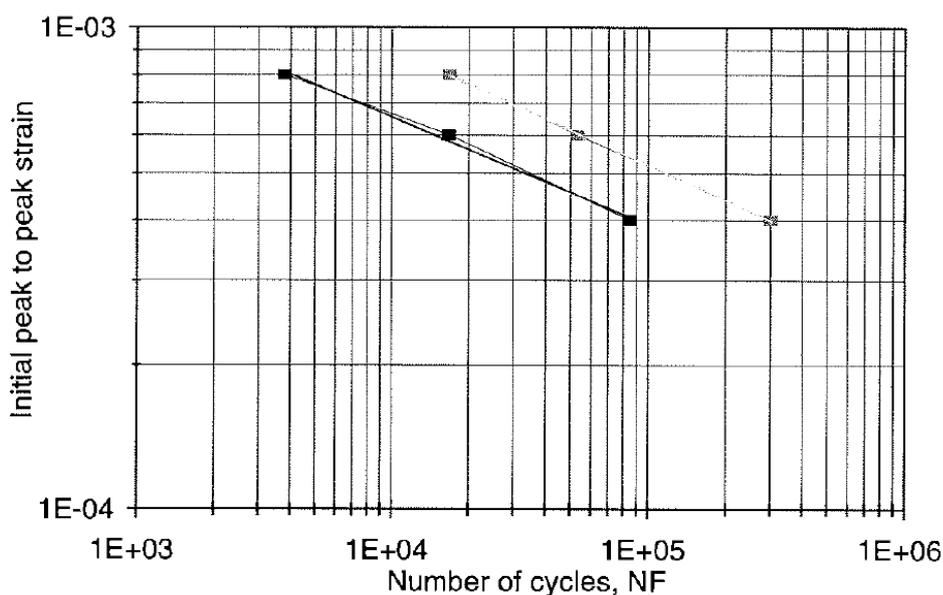


Figura 7: Deformação inicial “pico-a-pico” versus número de ciclos de ruptura de fadiga para misturas L4 (baixo teor de ligante e alto volume de vazios) e L9 (alto teor de ligante e baixo volume de vazios)

Fonte: Baburamani (1997)

O teor de ligante e o volume de vazios na mistura podem ser expressos como vazios preenchidos com ligante, e como se pode ver a vida de fadiga crescem com o aumento destes vazios preenchidos com ligante (VFB). O efeito combinado do teor de vazios e do volume de vazios também deve ser considerado como um parâmetro em modelos de previsão da vida de fadiga (Asphalt Institute, 1981; SHRP, 1994b; Harvey et al, 1995; Said, 1997).

Santucci (1977) aplicou um fator de correção para estimar vidas de fadiga de misturas com teores de ligante e de vazios exceto para misturas com $V_b = 11\%$ e $V_a = 5\%$, avaliadas em ensaios de fadiga com tensão controlada. O número corrigido de repetições da ruptura N_c foi dado pela relação:

$$N_c = N_f \times 10^M \quad (12)$$

Onde:

N_c = Número de repetições corrigido até a ruptura considerando teor de ligante e volume de vazios da mistura

N_f = Número de ciclos medidos em laboratório até a ruptura por fadiga

$M = 4,84 (VFB - 0,69)$

$VFB = (V_b / (V_b + V_a))$

b) Modelo do instituto do asfalto (Asphalt Institute):

O modelo do instituto do asfalto (Asphalt Institute, 1981) também se baseia em deformação e rigidez, mas também leva em conta a influência do teor de ligante (V_b) e do volume de vazios (V_a) na vida de fadiga. Neste modelo, o fator laboratório-campo incorpora a correção para o volume de vazios e para o teor de ligante utilizando a equação de Santucci. O fator laboratório-campo (SF) é dado por:

$$SF = 18,4 \times (10_M) \quad (13)$$

O modelo do Instituto do Asfalto é dado pela seguinte equação:

$$N_f = 18,4 \times 10^M \times (4,325 \times 10^{-3} \times (\epsilon)^{-3,291} \times E^{-0,854}) \quad (14)$$

Onde: $M = 4,84 (VFB - 0,69)$ e $VFB = (V_b / (V_b + V_a))$

Para uma mistura asfáltica com 5% de volume de vazios (V_a) e 11% de ligante em volume (V_b), o valor de M é zero, dado um fator laboratório-campo de 18,4 para 20% ou mais de área total do pavimento trincada por fadiga. A equação se reduziria a:

$$N_f = 0,07958 \times (\mathcal{E})^{-3,291} \times E^{-0,854} \quad (15)$$

O fator laboratório-campo no Instituto do Asfalto foi o mesmo utilizado em Finn et al, para 5% de volume de vazios e 11% de teor de ligante na mistura.

A estimativa do fator laboratório-campo utilizando a composição volumétrica da mistura sozinha sugere que o aumento no volume de vazios (mistura mais fraca) reduzirá o fator laboratório-campo. Enquanto um maior volume de vazios na mistura resulta em um comportamento à fadiga mais pobre, em geral, o fator laboratório-campo é dependente de muitos outros fatores encontrados no campo.

c) Modelo da Universidade de Nottingham:

Pell (1973) obteve uma equação de regressão para a vida de fadiga a um nível de $100 \mu\mathcal{E}$ ($\mathcal{E} = 10^{-4}$), representando o resultado de ensaios de tensão controlada em 54 misturas. A vida de fadiga em $\mathcal{E} = 10^{-4}$ foi escolhida para a análise, pois os resultados de laboratório foram pensados para serem mais precisos à baixo nível de deformações. A equação de regressão deste modo derivou, na qual incluiu parâmetros da mistura, do VFB (%) e da temperatura do ensaio de anel e bola ($T_{R\&B}$):

$$\text{Log } N (\mathcal{E} = 10^{-4}) = -16,34 + 6,03 (\log \text{VFB}) + 5,99 \log (T_{R\&B}) \quad (16)$$

d) Modelo do SHRP A-003A:

O American Strategic Highway Research Program (SHRP) desenvolveu uma detalhada avaliação do comportamento de misturas asfálticas ligadas a testes de laboratório. O projeto SHRP A-003A focou no comportamento à fadiga de misturas asfalto-agregados, incluindo a seleção de um método de ensaios para caracterização da vida de fadiga de misturas asfálticas em laboratório, a caracterização de misturas asfálticas de acordo com um plano experimental e modelo desenvolvido para previsão do comportamento à fadiga (SHRP 1994).

No desenvolvimento e calibração do modelo de previsão de vida de fadiga (SHRP 1994) o qual considerou a deformação inicial, perda de rigidez inicial e volume de vazios preenchidos com ligante como variáveis independentes afetando a vida de fadiga, observou-se que:

- a) A influência da rigidez da mistura asfáltica e o ângulo de fase na vida de fadiga podem ser expressos utilizando o parâmetro de perda de rigidez inicial S_0'' ($S_0'' = (S_{máx})_0 \times \text{sen } \phi_0$), o qual está relacionado a energia inicial dissipada por ciclo, W_0 ;
- b) O efeito do volume de vazios na vida de fadiga por ser levado em conta utilizando o volume de vazios ou os vazios preenchidos por ligante tão logo os parâmetros volumétricos influenciam o comportamento à fadiga;
- c) Em carregamentos com deformação controlada, a vida de fadiga é função da deformação inicial e da perda de rigidez (componente viscoso da rigidez à flexão), como por exemplo, a dissipação de energia inicial por ciclo, W_0 .

Inicialmente, foi sugerido o desenvolvimento de um modelo de previsão de fadiga dependente da deformação. Baseou-se no controle de testes de deformação controlada de fadiga envolvendo 32 misturas densas com ligante convencional. O modelo suplente proposto foi baseado em deformação inicial e perda de rigidez inicial, como dado abaixo:

$$N_f = 466,4 \times \exp^{0,052 \text{ VFB}} \times (\epsilon_0)^{-3,948} \times (S_0'')^{-2,77} \quad (17)$$

Onde:

N_f = vida de fadiga;

ϵ_0 = deformação inicial;

VFB = Volume de vazios preenchidos com ligante, e

S_0'' = perda de rigidez inicial (psi)

(Coeficiente de determinação, $R^2 = 0,846$)

O modelo acima foi recalibrado utilizando dados de laboratório adicionais de testes de misturas asfálticas utilizadas no projeto da mistura e de experimentos de equivalência de temperatura, e de testes de validação LCPC Nantes e FHWA ALF. Esses dados combinados geraram uma gama expandida de variáveis (dados adicionais de 12 misturas) para o modelo de previsão de fadiga. Um modelo obtido foi:

$$N_f = 2,738 \times 10^5 \times \exp^{0,077 VFB} \times (\epsilon_0)^{-3,624} \times (S_0)^{-2,72} \quad (18)$$

(Coeficiente de determinação, $R^2 = 0,785$)

Como a vida de fadiga prevista em laboratório necessita um fator laboratório-campo para se relacionar com o comportamento em campo, SHRP A-003A aplicou um fator de 13 para 10% de trincamento, como recomendado pelo NCHRP (Finn et al, 1986), para dar aceitabilidade das 44 misturas testes no projeto de fadiga SHRP A-003A para estruturas típicas de pavimento (10 a 20 cm de espessura), projetados utilizando o procedimento de dimensionamento da AASHTO. A análise confirmou em geral que o fator laboratório-campo de 13 era plausível para os tipos de misturas estudadas para o uso no Nordeste dos EUA.

Na sequência, em uma análise mais rigorosa utilizando multiplicadores de aferição, foi encontrado que o método de caracterização e a variabilidade na medição da vida de fadiga tinham um efeito na aceitabilidade das misturas nas estruturas de pavimentos testadas. A maioria destas misturas foi inadequada para o modelo NCHRP enquanto que as vidas de fadiga obtidas pelos testes de laboratório do SHRP para a maioria das misturas foram tidas como aceitáveis.

Para permitir que o comportamento no campo (tráfego projetado em eixos equivalentes corrigidos para 20°C) seja previsto a partir da equação de previsão de laboratório acima, um fator laboratório-campo de 10 para 10% de trincamento classe 2 e 14 para 45% de trincamento em área de trilho de roda fosse recomendada para uso em projeto e análise de misturas (SHRP, 1994b).

Harvey et al (1995) avaliou os efeitos do teor de ligante (de 4,5% a 6%) e volume de vazios (2%, 5% e 8%) no comportamento de fadiga de misturas típicas Californianas utilizando o equipamento e métodos de teste da SHRP. Incorporando os parâmetros de VFB no lugar do teor de ligante e do volume de vazios, uma equação laboratorial de previsão de vida de fadiga da seguinte forma foi sugerida:

$$N = 2,5875 \times 10^{-8} \times e^{0,053VFB} \times \epsilon_t^{-3,761} \times S_0^{-0,726} \quad (19)$$

Onde:

N = número de deformações repetidas para a fadiga,

ϵ_t = deformação de tração aplicada na fibra inferior da vida, e

S_0 = rigidez inicial da misturas (MPa),

(Coeficiente de determinação, $R^2 = 0,847$)

Harvey e Tsai (1997) estenderam o método de ensaios de fadiga do SHRP (SHRP 1994^a) e a abordagem do modelo de previsão de vida (SHRP 1994b) para estudar os efeitos do envelhecimento à longo prazo na vida de fadiga e a rigidez à flexão inicial em dois ligantes típicos da Califórnia com diferentes características de envelhecimento. Para a susceptibilidade por endurecimento, a equação de regressão linear foi obtida:

$$\ln N_f = -20,14 + 0,094 \text{ VFB} - 5,162 (\ln \epsilon_t) - 1,743 (\ln S_0'') \quad (20)$$

Onde:

N_f = vida de fadiga;

ϵ_t = deformação de tração inicial;

VFB = Volume de vazios preenchidos com ligante, e

S_0'' = perda de rigidez inicial (psi)

(Coeficiente de determinação, $R^2 = 0,847$)

Dependendo da variação dos tipos de misturas, composição e propriedades volumétricas testadas, os expoentes e coeficientes para diversas variáveis incluídos nos modelos podem variar, mesmo quando variáveis similares são incorporadas nos modelos.

Modelo baseado em carregamentos diametrais:

Enquanto vigas de dois, três ou quatro pontos são os métodos mais tradicionais de ensaios de fadiga em laboratório, diversos pesquisadores tem utilizado o ensaio de fadiga diametral (ensaio de tensão indireta) para estudar o comportamento à fadiga de misturas asfálticas. Estes testes foram desenvolvidos com modo de carregamento de tensão controlada. Said (1997) testou amostras extraídas de campo de estrada típica sueca em carregamento diametral de fadiga à 5°C e 15°C. O teor de ligante da mistura era de 4%. Uma equação de previsão de vida de fadiga incorporou módulo resiliente ao invés da convencional rigidez á flexão, e também deformação e volume de vazios preenchidos com ligante. E daí foi obtida a análise de regressão. A equação para o mistura foi baseada em ensaio de tensão indireta:

$$\log N_f = 18 - 3,56 \log \mu\epsilon - 1,79 \text{ MR} + 0,023 \text{ VFB} \quad (21)$$

N_f = número de deformações repetidas para a fadiga,

$\mu\epsilon$ = Deformação de tração horizontal (em microstrain)

MR = Módulo resiliente (MPa), e

VFB = Volume de vazios preenchidos com ligante (%)

Este modelo seria plenamente passível de ser aplicado aos dados coletados nesta dissertação, não fosse pelo fato de que o modelo se abasteceu de dados de ensaios de fadiga realizados à temperatura de 5° a 15°. Pois as variáveis utilizadas foram as mesmas coletadas para as misturas estudadas.

2.3.2 Modelos de previsão de vida de fadiga utilizando energia dissipada

a) Geral

Na abordagem da energia dissipada, a qual engloba a resposta por tensão e deformação e a resposta viscoelástica-dinâmica, a energia inicial dissipada por volume pode ser relacionada ao número de ciclos até a falha e ao início de acumulação do dano durante carregamento repetitivo (van Dijk e Visser, 1977; Lytton et al, 1993; Rowe, 1993; Tayebali et al, 1993).

Van Dijk (1975) desenvolveu o ensaio de fadiga de trilho de roda de placa de asfalto sobre rodado giratório e concluiu que o padrão de trincas foi muito parecido ao tipo “couro de jacaré” de trincamento por fadiga observada no campo, e concluiu que, com a aplicação do conceito da dissipação de energia para fadiga, os resultados do ensaio de laboratório em modo carregamento por flexão poderia ser utilizado como um critério para fadiga. Utilizando o conceito de energia dissipada, foram também calculadas a deformação admissível ao asfalto como função do número de repetições da deformação e da rigidez à flexão, em torno de uma gama de valores de rigidez à flexão (van Dijk e Visser, 1977). Entretanto, Claessen et al (1977) observaram que a deformação admissível não foi uma função simples de rigidez e do número de repetições de carregamento aplicáveis a todos os tipos de misturas, mas em vez, ainda eram dependentes do tipo da mistura.

b) Energia dissipada inicial

A pesquisa de fadiga SHRP A-003A desenvolveu também um modelo suplente para previsão de vida de fadiga baseado na dissipação de energia inicial por ciclo (W0) (SHRP 1994b). A dissipação de energia inicial por ciclo foi medida no 50° ciclo da área do laço

histerético. Para um carregamento haversine de tensão, o SHRP utilizou a seguinte equação para estimar o ângulo de fase do laço histerético de tensão/deformação:

$$W_0 = 0,25\pi (\epsilon_0)^2 \times ((S^{mix})_0 \times \sin \phi_0) \quad (22)$$

O modelo de previsão de vida de fadiga laboratorial de energia dissipada segue:

$$N_f = 2,365 \times \exp^{0,069} \text{VFB} \times (W_0)^{-1,882} \quad (23)$$

Onde:

N_f = Vida de fadiga;

W_0 = Dissipação de energia inicial por ciclo no 50º ciclo (em psi), e

VFB = Vazios preenchidos com ligante (%)

(Coeficiente de determinação, $R^2 = 0,755$)

c) Dissipação de energia e início do trincamento

Falha ou trincamento terminal devido à fadiga é geralmente um processo de dois estágios, composta pelo início do trincamento seguido da propagação do trincamento, em uma taxa dependente de: características viscoelásticas, agregados, volume de vazios e espessura do filme de ligante da mistura a ser investigada. Em ensaios de fadiga de laboratório, a ruptura é definida como o número de ciclos no qual a rigidez à flexão é reduzida a 50% da rigidez à flexão inicial.

De acordo com Pronk (1997), se a razão de dissipação de energia até um determinado período (número de ciclos, N) e a energia total dissipada em N é plotada contra um número de ciclos, então o início das microtrincas pode ser identificado quando uma mudança aguda na declividade da linha reta é observada. A razão de energia, ψ , pode também ser estimada em outro valor de N tal que um número de ciclos para o início do trincamento, N_i . Em testes de laboratório de flexão (tensão ou deformação controlada), o início do trincamento acredita-se que aconteça quando a rigidez a flexão ocorro de 40% a 50% menos do que o valor inicial (Rowe, 1993). Lytton et al (1993) também tem desenvolvido um procedimento para a previsão do início do trincamento em teste de fadiga utilizando a razão da mudança da dissipação da energia por ciclo, como já discutido.

A razão da energia no número de ciclos do início do trincamento, $\psi_i = (N_i \times W_0) / W_i$, onde W_i é a dissipação de energia acumulada no início do trincamento N_i . A razão da energia no início do trincamento pode ser definida mais facilmente como a razão da perda de rigidez inicial para a perda de rigidez no início do trincamento. Rowe assumiu que o início do trincamento ocorreu em um número de ciclos correspondente a uma redução de 60% na rigidez à flexão.

Rowe desenvolveu ensaios à deformação e a tensão controlada em carregamento senoidal utilizando amostras trapezoidais de 21 misturas com diferentes tipos de ligante, teores de ligante e graduação de agregados. Ainda, dados de fadiga de outras fontes de publicações forem incluídas na análise. Rowe encontrou o logaritmo da dissipação de energia inicial ($\log W_0$) correlacionado muito fortemente com N_i . Um modelo de regressão para prever N_i com o teor de ligante, V_b (%), dissipação inicial de energia, W_0 (Joule/m³) e a razão da energia no início do trincamento, ψ_i , foram tidas como variáveis dependentes. O modelo de início do trincamento (Coeficiente de determinação $R^2 = 0,703$) segue:

$$N_i = 205 \times (V_b)^{6,44} \times (W_0)^{-2,01} \times (\psi_i)^{1,64} \quad (24)$$

O expoente de -2,01 para o termo de dissipação de energia inicial (W_0) no modelo de início de trincamento se equiparou razoavelmente bem com o expoente -1,882 obtido pelo SHRP (SHRP 1994b) no seu modelo para previsão do número de ciclos na ruptura (50% da redução de rigidez), entretanto prestou suporte para a hipótese sugerida por alguns pesquisadores (Finn et al, 1986; SHRP, 1994b) onde o N_f na relação convencional de deformação (ϵ) por vida de fadiga (N_f) obtida em ensaios laboratorial de deformação controlada é o número de aplicações de carregamento para o início do trincamento, e portanto todos os modelos de previsão de vida de fadiga se relacionam ao número de ciclos para o início do trincamento.

Uma abordagem mais complexa para o tratamento da dissipação de energia na fase de início do trincamento por fadiga em ensaios de laboratório foi dada por pesquisadores de Dutch (Pronk, 1995). A hipótese básica nesta abordagem é que uma pequena mas constante proporção de dissipação de energia seja responsável pelo dano à fadiga no início do trincamento.

d) Dissipação de energia total e vida de fadiga

A única relação específica para mistura entre dissipação de energia e ruptura por fadiga e o número de repetições de carregamento é dado por:

$$W_{FAT} = A (N_{FAT})^z \quad (25)$$

Onde A e z são constantes dependentes experimentalmente da mistura (van Dijk, 1975; van Dijk e Visser, 1977). W_{FAT} é a energia total dissipada ou acumulada no número de ciclos da ruptura N_{FAT} . Ele é a soma de todas as áreas dentro da área do laço histerético tensão/deformação, no fim do ensaio de fadiga.

Da relação para a energia dissipada total e do número de aplicações de carga, razão da energia, módulo de rigidez inicial e ângulo de fase da mistura, a equação da vida de fadiga derivou:

$$\epsilon_{FAT} = (A \psi / \pi S_{mix} \sin \phi_0)^{0,5} \times (N_{FAT})^{(z-1)/2} \quad (26)$$

A razão da energia, ψ , em N_{FAT} é definida como:

$$\Psi = (N_{FAT} \times W_0) / W_{FAT} \quad (27)$$

A razão de energia é maior do que 1 para ensaio em deformação controlada e menor do que 1 para carregamento em tensão controlada (van Dijk e Visser, 1977).

Se a razão de energia fosse 1,25 para ensaio com deformação controlada, e usando o mesmo dado de laboratório obtido para o modelo com deformação, rigidez e teor de ligante (anteriormente citado) Shell (1978) gerou o seguinte modelo baseado no conceito de dissipação de energia:

$$\epsilon_{FAT} = 3,6 \times (A / \pi S_{mix} \times \sin \phi_0)^{0,57} \times (N_{FAT})^{0,57(z-1)} \quad (28)$$

O modelo de dissipação de energia não está incluído no programa computacional de Shell ou no seu caderno de projetos e é aplicado um fator laboratório-campo de 10 à este modelo (como no modelo de Shell).

Para finalizar, pode-se dizer que dos modelos apresentados, os mais amplamente utilizados são os modelos de Shell, SHRP, e do Instituto do Asfalto/NCHRP/Finn et al. Os métodos de ensaios na concepção destes três modelos é diferente, daí a diferença entre os fatores laboratório-campo utilizado nos três modelos. Até porque os modelos de Shell e SHRP lançam mão de ensaios com deformação controlada e são aplicáveis à pavimentos delgados, já o modelo do Instituto do Asfalto/NCHRP/Finn et al se utiliza de ensaios com tensão controlada.

Concluiu-se dessa revisão de modelos de previsão de vida de fadiga, que modelos de previsão que incorporam perda de rigidez inicial e dissipação de energia inicial por ciclo são capazes de prever o início e a propagação das trincas, porém, devem ser validados com observações de campo. Devem ser levadas em conta em modelos de previsão, variáveis como volume de vazios preenchidos com ligante, teor de ligante.

Existem diversas variáveis que não são levadas em conta em ensaios laboratoriais, como por exemplo: fatores ambientais, variações nos carregamentos como tipo de veículo, de rodados e de configurações de eixos, períodos de descanso, envelhecimento da mistura, recuperação de trincas, mecanismo de propagação de trincas, etc. Daí a necessidade de se calibrar fator laboratório-campo sempre que se for utilizar um modelo destes.

Conclui-se ainda que a maioria dos modelos criados pela bibliografia internacional utiliza para o parâmetro de rigidez da mistura, a perda de rigidez à flexão da mistura, e poucos modelos utilizam o módulo de resiliência.

2.4 IMPACTO DA CAL NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE MISTURAS ASFÁLTICAS À QUENTE

Little, Epps e Sebaaly (2006) realizaram um estudo somado à uma revisão sobre com o tema: os benefícios da cal hidratada em misturas asfálticas à quente, comportando desde o mecanismo que compõem a ação química da cal na mistura, passando por um histórico de pesquisas realizadas e exemplos práticos aplicados, se estendendo também ao estudo das diferentes formas de incorporação da cal até um estudo da vantagem econômica do uso da mesma. Estudou ainda a influência da cal nas propriedades mecânicas das misturas asfálticas, estudo este que segue descrito adiante.

As propriedades mecânicas de misturas asfálticas à quente desempenham um papel importante no dimensionamento e em análises de desempenho do pavimento. Elas regem as

relações entre as cargas do tráfego e a resposta do pavimento desempenho, e do comportamento à longo prazo da estrutura do pavimento sob a ação combinada de tráfego e intempéries. Propriedades mecânicas típicas de misturas asfálticas à quente incluem o módulo de resiliência em função da temperatura e taxa de carregamento, e fadiga e o respectivo comportamento à ruptura como relações de desempenho. Como a comunidade de engenharia de pavimentação aproxima-se da implementação do guia de projeto de pavimentos mecanístico-empírico da AASHTO (MEPDG), o conhecimento das propriedades mecânicas das misturas asfálticas à quente tornam-se uma alta prioridade.

Uma mistura asfáltica à quente ideal pode ser caracterizada como tendo boas propriedades de módulo de resiliência, sob condições de campo antecipadas e excelente resistência à ruptura por fadiga. Quando tal mistura ideal é incorporada num projeto mecanístico de pavimentos, um excelente desempenho à longo prazo pode ser vislumbrado, bem como uma significativa redução de custos. Diversos materiais e fatores de projeto de misturas influenciam a magnitude das propriedades mecânicas de misturas asfálticas à quente, tais como: teor de ligante, granulometria e qualidade dos agregados, propriedades volumétricas da mistura. O tratamento com cal para as misturas asfálticas à quente demonstrou positivamente influenciar as propriedades mecânicas de misturas asfálticas.

Pesquisadores da Universidade do Texas A & M avaliaram o impacto dos períodos de repouso na recuperação das misturas asfálticas à quente (Si et al, 2002). Diferentes períodos de repouso foram introduzidos no teste de fadiga uniaxial de misturas não tratada e tratada com cal, utilizando cascalho de rio e pedra calcária triturada do Texas. Acredita-se que períodos de repouso durante testes de fadiga simulam melhor as condições de campo, visto que carregamentos repetidos de tráfego ocorrem no campo sempre após o pavimento ter tido tempo para se recuperar. O índice de cura foi definido como o percentual de aumento na rigidez da mistura asfáltica à quente, após a introdução do períodos de repouso. Os pesquisadores concluíram que o grau de recuperação é dependente da mistura e da capacidade de uma mistura de curar-se está em grande parte relacionada a propriedades dos ligantes. A adição de cal hidratada a misturas ensaiadas, em geral melhoraram o potencial de recuperação das misturas.

Little e seus colegas usaram o teste torsional de fadiga para avaliar o impacto do tratamento de cal sobre a vida de fadiga de misturas asfálticas com areia (Little e Kim, 2002) e Kim et al. (2003). Os dados da Tabela 01 mostram que o efeito da cal hidratada como um *filler* aumentou a vida de fadiga da mistura de areia-asfalto com ligante AAD-1 em cerca de 240 por cento, e a vida de fadiga da mistura de areia com ligante AAM-1 em cerca de 100 por

cento. Os pesquisadores também usaram o acúmulo de energia dissipada como uma indicação de resistência à fadiga, que mostrou que a adição de cal aumentou a resistência à fadiga em 588 e 442 por cento para os ligantes AAD-1 e AAM-1, respectivamente.

Tabela 1: Impacto da cal hidratada na vida de fadiga torsional de misturas asfalto-areia (Little e Kim, 2002)

Deformação (%)	Ligante: AAD-1			Ligante: AAM-1	
	Referência	Enchimento calcáreo	Enchimento de cal hidratada	Referência	Enchimento de cal hidratada
0,20	34,555a	65,610 (90)b	NA	20,660	36,210 (75)
0,28	10,060	18,843 (87)	45,960 (357)	4,510	11,235 (150)
0,40	3,860	7,577 (96)	13,110 (240)	2,110	4,210 (100)

a: número médio de ciclos de carregamento até a falha por fadiga

b: percentual de aumento na vida de fadiga comparado a misturas sem enchimento

Fonte: Little e Kim, 2002 *apud* Little et al (2006)

Num esforço para incorporar à misturas asfálticas tratada com cal no AASHTO MEPDG, Bari e Witczak mediram o efeito de cal sobre o módulo de elasticidade dinâmico (E^*) de misturas asfálticas (Bari e Witczak, 2005). O AASHTO MEPDG usa E^* como a propriedade primária do material para misturas asfálticas. Portanto, qualquer impacto do tratamento de cal na propriedade E^* de misturas asfálticas introduzirá mudanças na concepção da estrutura do pavimento. A pesquisa mediu a propriedade E^* de dezessete diferentes misturas amostradas a partir de seis diferentes locais ao redor dos Estados Unidos: seis misturas não contêm cal e onze misturas tinham cal hidratada com até 3% do peso seco de agregado. Os dados na Tabela 02 mostram que a adição de cal hidratada aumenta o módulo dinâmico de misturas asfálticas entre 17 e 50 por cento. Os pesquisadores concluíram que a E^* de uma mistura tratada com cal (1-2% de cal) será de aproximadamente 1,25 vezes a E^* de misturas não tratadas, independente da temperatura e/ou tempo de variação do carregamento.

Tabela 2: Relação de E^* com cal e E^* sem cal de Witczak e Bari (2004)

Temperatura (°C)	Teor de cal hidratada (percentual de peso seco de agregado)				
	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0
-10,0	1,24	1,07	1,31	1,33	1,34
4,4	1,12	1,1	1,21	1,43	1,22
21,1	1,26	1,31	1,06	1,91	1,31
37,8	1,21	1,51	1,15	1,39	1,3
54,4	1,21	1,09	1,14	1,45	1,25
Média	1,21	1,22	1,17	1,50	1,28
Desv. Pad.	0,06	0,19	0,09	0,23	0,05
Coef. Var.	5	16	8	15	4

Fonte: Little et al (2006)

Aumentos significativos de módulo, fadiga e resistência à ruptura da mistura asfálticas leva a reduzir à espessura da camada e melhorar o desempenho à longo prazo. No processo mecanicista de concepção do pavimento, o efeito do aumento do módulo e melhoria da resistência à fadiga e deformação permanente são acumulados exponencialmente. Noutras palavras, o módulo de elasticidade mais elevado resultaria em mais baixas deformações nas camadas da mistura. Quando deformações mais baixas são introduzidas em uma relação melhorada entre fadiga e ruptura, uma melhoria significativa no desempenho do pavimento ocorre.

2.5 ESTUDOS PRECEDENTES

Neste capítulo serão apresentados os estudos e resultados obtidos por Bock (2012), visto que, esta dissertação vem a complementar o estudo realizado por ele. Estes estudos realizados pelo mesmo foram: definições das abordagens adotadas para verificação da influência da incorporação de diferentes tipos de cal nos concretos asfálticos, definição de teor de cal a ser incorporado nas misturas, caracterização mecânica das misturas e estudo de adesão e coesão das misturas com aplicação da metodologia UCL.

2.3.3 Dosagem

Neste item de dosagem das misturas são descritos os procedimentos seguidos por Bock (2012) para dosagem das misturas, forma de incorporação e teor de cal necessário para promover melhorias nas propriedades das misturas. Para definir as alternativas adotadas foram realizados ensaios comparativos entre as misturas, sendo eles: módulo de resiliência (MR), resistência à tração (RT) e resistência à tração retida (RRT – Metodologia Lottman).

2.5.1.1 Parâmetros de dosagem Marshall

Para a realização de uma análise comparativa entre as misturas sem cal e com cal hidratada, Bock (2012) descreve que enfrentou inicialmente certa dificuldade na fixação de parâmetros (teor de ligante da mistura, volume de vazios, curva granulométrica), pois os

mesmos estão diretamente interligados, e passam a ser modificados quando se faz a incorporação de um novo elemento na mistura, a cal.

Preliminarmente optou-se pela forma de incorporação de cal seca sobre agregado graúdo, e uma simples substituição de 1% do pó-de-pedra da composição granulométrica da mistura em questão pela mesma quantidade de cal (mantendo teor de ligante de projeto constante), por entender-se que qualquer alteração no teor de ligante poderia disfarçar e dificultar a quantificação dos efeitos da incorporação de cal, esta mistura foi nomeada por Bock (2012) como “*Teor Ligante Projeto Referência*”. Mas isso causou redução significativa do volume de vazios (VV), deixando fora da faixa de valores da especificação DNER-ME 043/95 para misturas convencionais (3% a 5%), o que demonstra a inconveniência da simples substituição.

Este fato pode ser explicado, por Bock (2012), pela diferença de massa específica, massa específica aparente solta e granulometria dos materiais (pó-de-pedra com massa específica de $2,83\text{g/cm}^3$ e massa específica aparente solta de $1,72\text{g/cm}^3$ e cal hidratada com massa específica média de $2,27\text{g/cm}^3$ e massa específica aparente solta de $0,52\text{g/cm}^3$). Como a substituição destes materiais foi realizada em massa, acrescentou-se um volume de material maior do que o volume retirado. Adicionalmente, substituiu-se material mais graúdo por material mais fino, o que causou o “fechamento” da mistura. A soma destes fatores causou diminuição do volume de vazios da mistura, mantendo-se o teor de ligante inalterado.

Uma alternativa testada, buscando alcançar um VV adequado, foi substituir o material passante na peneira #200 da composição por cal, dada a semelhança nas características dos materiais. Entretanto, não se obteve os resultados desejados. Ainda, tentou-se ajustar a curva granulométrica de forma a adequar o volume de vazios da mistura com incorporação de cal, igualmente sem resultados positivos.

Após insucessos decorrentes da adoção dessas alternativas, considerou-se mais adequada a manutenção da composição granulométrica (persistindo substituição de 1% do pó-de-pedra pela mesma quantidade de cal) e do volume de vazios da mistura (julgado o mais importante), adotando-se como solução a realização de novas dosagens. Procedeu-se, então, a nova dosagem das misturas considerando a incorporação da cal hidratada, ou seja, definiu-se um novo traço, como solução para manter o volume de vazios na faixa de aceitabilidade, mistura esta que foi nomeada por Bock (2012) como “*Teor Ligante Projeto Adição Cal*”. A

partir dessa nova dosagem definitiva foram determinados os parâmetros de dosagem Marshall, que são apresentados nas Tabelas 03 e 04, e nas Figuras 08 e 09.

Tabela 3: Parâmetros de dosagem Marshall para misturas com ligante convencional CAP 50/70 nos teores de projeto (Misturas de referência, com cal calcítica e com cal dolomítica)

<i>Propriedade</i>	<i>Especificação</i>	<i>Mistura CAP 50/70</i>		
		<i>Referência</i>	<i>Cal Calcítica</i>	<i>Cal Dolomítica</i>
<i>Teor de Ligante (%)</i>	--	4,60	4,20	4,20
<i>Volume de Vazios (%)</i>	3 a 5	3,84	3,97	3,77
<i>Relação Betume Vazios (%)</i>	75 a 82	74,26	71,73	72,75
<i>Vazios do Agregado Mineral (%)</i>	>16	14,91	14,03	13,85
<i>Massa Esp. Máx. Medida (g/cm³)</i>	--	2,553	2,546	2,543
<i>Massa Esp. Aparente (g/cm³)</i>	97% (mínimo)	2,455	2,445	2,447
<i>Estabilidade (kgf)</i>	>800	1230	1020	1210
<i>Fluência (1/100 in)</i>	8 a 16	9,50	12,40	12,10

Fonte: Bock (2012)

Tabela 4: Parâmetros de dosagem Marshall para misturas com ligante modificado CAP 60/85 nos teores de projeto (Misturas de referência, com cal calcítica e com cal dolomítica)

<i>Propriedade</i>	<i>Especificação</i>	<i>Mistura CAP 60/85-E</i>		
		<i>Referência</i>	<i>Cal Calcítica</i>	<i>Cal Dolomítica</i>
<i>Teor de Ligante (%)</i>	--	4,70	4,50	4,50
<i>Volume de Vazios (%)</i>	3 a 5	4,05	3,89	3,84
<i>Relação Betume Vazios (%)</i>	75 a 82	73,56	73,47	73,82
<i>Vazios do Agregado Mineral (%)</i>	>16	15,30	14,68	14,67
<i>Massa Esp. Máx. Medida (g/cm³)</i>	--	2,546	2,543	2,552
<i>Massa Esp. Aparente (g/cm³)</i>	97% (mínimo)	2,443	2,444	2,454
<i>Estabilidade (kgf)</i>	>800	1612	1255	1374
<i>Fluência (1/100 in)</i>	8 a 16	12,30	14,34	12,20

Fonte: Bock (2012)

Bock (2012) relata que a explicação para o fato do RBV e de VAM estarem abaixo da especificação está nas características dos agregados e da britagem, evento já observado em outros projetos de mistura realizados no LAPAV.

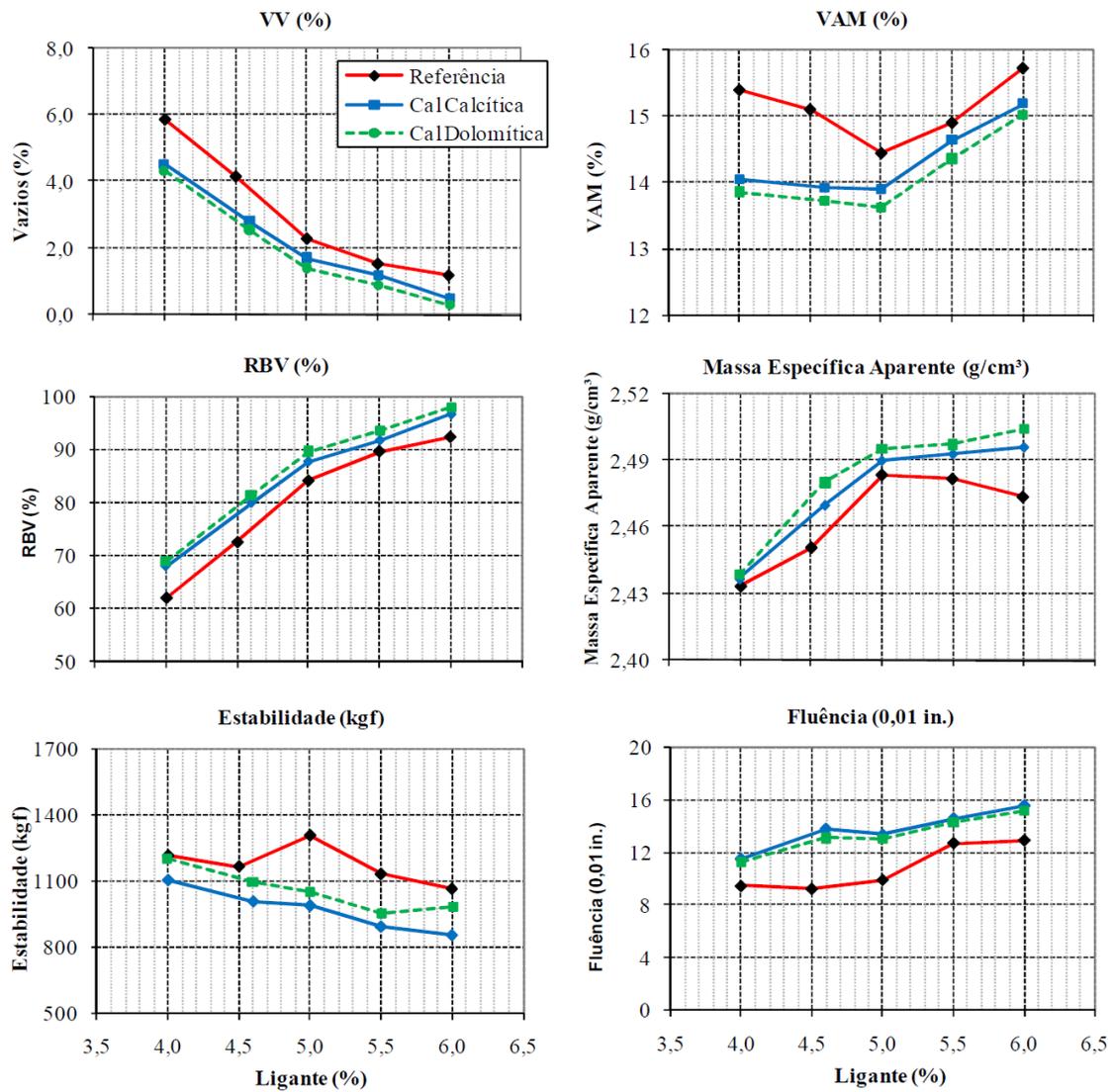


Figura 8: Parâmetros Marshall das misturas com ligante convencional CAP 50/70 para cinco diferentes teores de ligante

Fonte: Bock (2012)

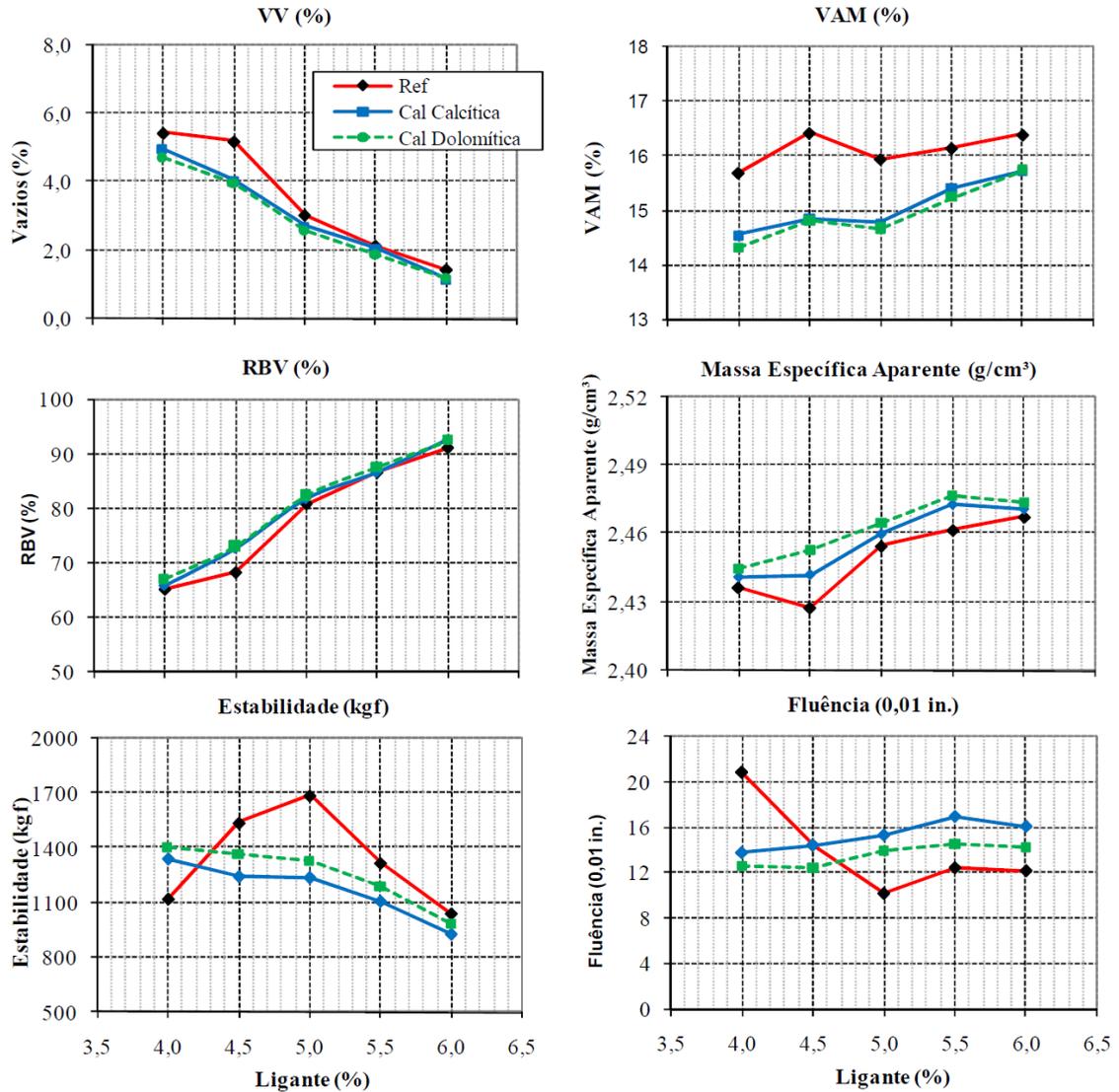


Figura 9: Parâmetros Marshall das misturas com ligante modificado CAP 60/85 para cinco diferentes teores de ligante

Fonte: Bock (2012)

2.5.1.2 Resistência e módulo de resiliência

Apresenta-se a seguir uma análise comparativa entre as propriedades mecânicas das misturas com simples substituição de material (Teor de Ligante Projeto Referência) e com projeto específico (Teor de Ligante Projeto Adição de Cal), justificando a adoção desta última alternativa, em função das misturas com projetos específicos apresentarem um desempenho superior ao daquelas em que se fez somente a substituição de materiais (pó-de-pedra por cal hidratada), considerando a ideia inicial de manter-se o teor de ligante de projeto.

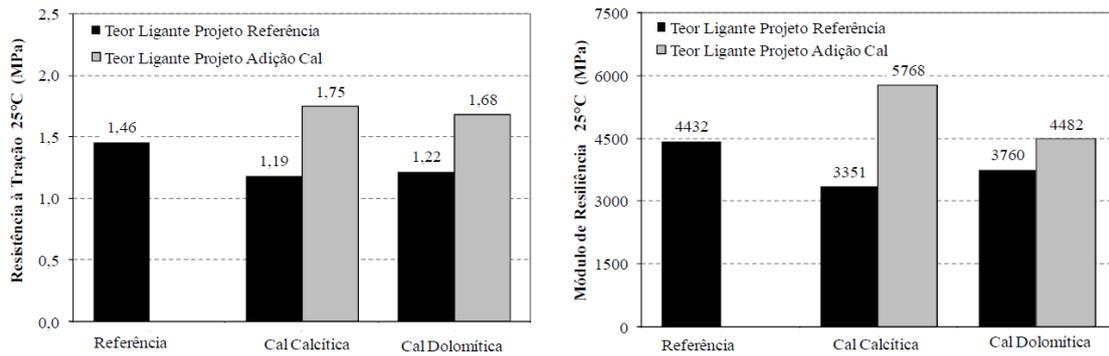


Figura 10: Efeitos da incorporação de cales na resistência à tração e no módulo de resiliência a 25°C em misturas com ligante convencional CAP 50/70 (RT e MR em MPa)

Fonte: Bock (2012)

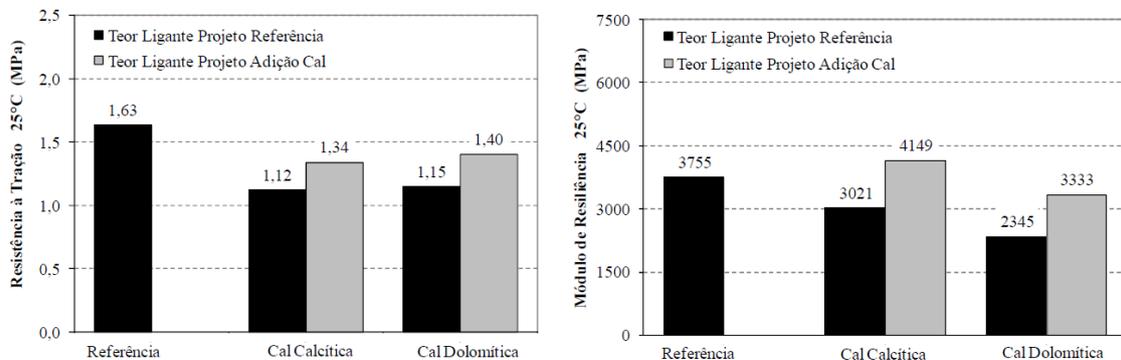


Figura 11: Efeitos da incorporação de cales na resistência à tração e no módulo de resiliência a 25°C em misturas com ligante modificado CAP 60/85 (RT e MR em MPa)

Fonte: Bock (2012)

2.5.1.3 Adesividade

Para evidenciar a influência do teor de ligante das duas misturas (mistura “*Teor Ligante Projeto Adição Cal*” e mistura “*Teor Ligante Projeto Referência*”), falta ou excesso de ligante, fato que pode estar causando a redução de volume de vazios nas misturas em que houve simples substituição de material da curva granulométrica, realizou-se a verificação da adesividade das misturas através da metodologia Lottman Modificada, considerando-se as duas (02) misturas. Os resultados de Resistência Retida a Tração (RRT) para misturas com ligante convencional e modificado são apresentados na Figura 10.

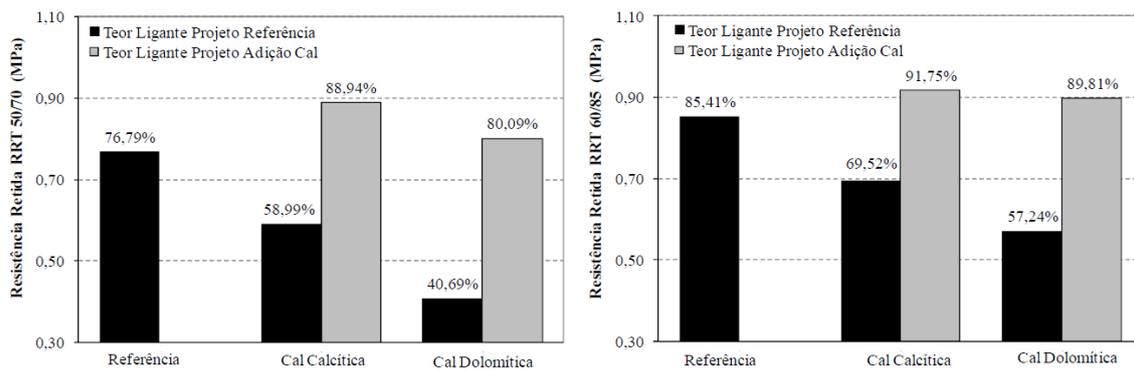


Figura 12: Efeitos da incorporação de cales na resistência retida a tração a 25°C em misturas com CAP 50/70 e CAP 60/85 (%)

Fonte: Bock (2012)

Observou-se tanto para os resultados com ligante convencional quanto para o ligante modificado que possivelmente houve um excesso de ligante quando utiliza-se a simples substituição de material. Nas misturas onde o teor de ligante foi mantido inalterado, ou seja, substituindo-se 1% do pó-de-pedra pela mesma quantidade de cal hidratada e mantendo-se o teor do projeto original (sem cal), observou-se nitidamente uma queda expressiva na RRT. Essa queda observada para ambos os ligantes utilizados, foi maior quando se utilizou a cal dolomítica.

Ao contrário, quando são avaliadas as misturas dosadas através de projeto específico, alterando-se o teor de ligante, constata-se que seus valores de RRT foram superiores aos das misturas sem incorporação de cal (mistura de Referência).

Observou-se neste caso, a influência e a importância de dois fatores. O primeiro foi o tipo de abordagem que foi adotada, ou seja, a necessidade de um projeto específico compatível com a composição granulométrica e materiais constituintes da mistura. O segundo fator foi a influência do tipo de cal empregada nas misturas asfálticas. Este último será discutido mais detalhadamente nos itens seguintes.

2.5.1.4 Estudo do teor a ser utilizado

Levando em consideração os resultados preliminares apresentados anteriormente, definiu-se que a metodologia de análise a ser adotada era aquela em que se fixava o volume de vazios das misturas e realizava-se uma dosagem específica para a composição

granulométrica gerada com a incorporação de 1% de cal hidratada (substituição de 1% de pó-de-pedra pela mesma quantidade de cal hidratada).

Após esta definição surgiu o questionamento se realmente 1% de substituição seria suficiente para potencializar os efeitos da cal nas misturas. Consultas realizadas em bibliografias nacionais e internacionais mostraram que normalmente é utilizado um percentual de cal incorporado de 1% a 2%.

Bock (2012) decidiu, então, realizar mais uma análise em que foram comparados resultados de resistência, módulo e adesividade de misturas com 1% e 2% de cal hidratada. E ele observou que os resultados, tanto de resistência quanto de módulo, foram ligeiramente superiores quando se utilizou teores de 1% de cal. Esta constatação alinha-se com resultados nacionais de Núñez et al. (2007), e com a experiência dos EUA, onde geralmente os teores ótimos de cal estão compreendidos entre 1% e 2%, com relação ao peso seco dos agregados pétreos.

Núñez et al. (2007) constataram que a incorporação de cal acima de 1% (2% neste caso) não causa melhorias adicionais nas propriedades das misturas asfálticas, ocorrendo diminuição tanto da resistência quanto do módulo das misturas, que assumiram valores até mesmo inferiores aos das misturas de Referência (sem incorporação de cal).

O percentual de incorporação de cal afeta significativamente os valores de RRT, quando a porcentagem de cal incorporada é elevada de 1% para 2% não se obtém influência positiva nas propriedades analisadas. Este fato evidencia a existência de um “teor ótimo de cal”, onde o percentual de incorporação de 1% mostrou-se mais efetivo do que 2%.

Concluindo sobre a forma de análise da influência da incorporação de cal nas misturas asfálticas, Bock (2012) definiu a linha de projeto a ser seguida, ou seja, determinou-se que a melhor forma de incorporação de cal é aquela em que se utiliza um projeto específico e o teor ideal de cal a ser adotado, para os materiais utilizados nesta pesquisa corresponde a 1%. Na Tabela 15 é apresentado um resumo das propriedades analisadas com incorporação de 1% e 2% de cal com variações positivas (aumentos) e negativas (diminuições).

Tabela 5: Variação dos resultados de RRT, RT e MR com incorporação de 1% e 2% de cal

<i>Propriedade</i> <i>Mistura</i>	<i>RRT</i> <i>1%</i>	<i>RRT</i> <i>2%</i>	<i>1% Cal</i>		<i>2% Cal</i>	
			<i>RT</i>	<i>MR</i>	<i>RT</i>	<i>MR</i>
<i>50/70 REF</i>	REF	REF				
<i>50/70 + CC</i>	↑ 12,2%	↑ 01,4%	↑ 19,6%	↑ 29,4%	↓ 11,8%	↓ 03,6%
<i>50/70 + CD</i>	↑ 03,3%	↓ 04,3%	↑ 15,1%	↑ 01,8%	↓ 14,5%	↓ 08,5%
<i>60/85 REF</i>	REF	REF				
<i>60/85 + CC</i>	↑ 06,4%	↑ 00,9%	↓ 17,8%	↑ 10,5%	↓ 23,4%	↓ 19,5%
<i>60/85 + CD</i>	↑ 01,5%	↓ 04,7%	↓ 14,1%	↓ 11,2%	↓ 19,5%	↓ 01,0%

Fonte: Bock (2012)

Evidenciou-se a importância do teor e do tipo de cal empregado nas misturas, pois nem sempre um maior teor de cal corresponde a melhores resultados, o mesmo também vale para o tipo de cal empregada. Necessita-se de cales com altos teores de óxidos e hidróxidos de cálcio para que os resultados sejam satisfatórios.

E mesmo com redução do teor de ligante das misturas, o que representa economia no processo de produção, houve um desempenho superior nas misturas com incorporação de cal.

Após a definição de abordagem a ser adotada Bock (2012), foi procedida a moldagem das amostras para a realização dos ensaios descritos a seguir.

2.5.2 Caracterização mecânica das misturas

Apresenta-se a seguir os resultados dos ensaios realizados por Bock (2012) de resistência a tração (RT) e módulo de resiliência (MR) para as misturas preparadas com ligante convencional (CAP 50/70) e ligante modificado (CAP 60/85-E) com incorporação de cal calcítica e cal dolomítica, com ensaios realizados nas temperaturas de 25°C e 35°C antes e após processo de condicionamento das amostras que avaliam a suscetibilidade das misturas asfálticas à ação deletéria da água e ao envelhecimento, derivado de Moura (2001), conforme descrito:

- Imersão das amostras em água à temperatura de 60°C, por 48 horas;
- Estabilização das amostras à temperatura de 25° C por 24 horas;
- Envelhecimento em estufa à temperatura de 80° C por 24 horas.

Os resultados são apresentados em uma sequência de tabelas, onde temos:

a) Resultados de RT e MR das misturas nas temperaturas de 25°C e 35°C com o objetivo de evidenciar as influências proporcionadas pela incorporação de cal. Além disso, são apresentados resultados antes e após um processo de condicionamento (SC – Sem Condicionamento e CC – Com Condicionamento) que foi realizado com o objetivo de simular um envelhecimento das amostras;

b) Variações sofridas em função do processo de condicionamento para as duas temperaturas de ensaio (25°C e 35°C);

c) Valor de resistência retida ou módulo retido em função das diferentes temperaturas de ensaio (RT 35°C/RT 25°C e MR 35°C/MR 25°C).

Tabela 6: Variação percentual das propriedades das misturas asfálticas em função da incorporação de cal e condicionamento das amostras (25°C)

<i>Propriedade (25°C)</i> <i>Mistura</i>	<i>RRT</i>	<i>Sem Cond.</i>		<i>Com Cond.</i>	
		<i>RT</i>	<i>MR</i>	<i>RT</i>	<i>MR</i>
<i>50/70 REF</i>	REF	REF	REF	↓ 12,3%	↑ 14,5%
<i>50/70 + CC</i>	↑ 12,2%	↑ 19,9%	↑ 29,3%	↑ 10,3%	↑ 17,6%
<i>50/70 + CD</i>	↑ 03,3%	↑ 15,1%	↑ 01,8%	↑ 03,6%	↑ 02,8%
<i>60/85 REF</i>	REF	REF	REF	↓ 05,6%	↑ 07,5%
<i>60/85 + CC</i>	↑ 06,4%	↓ 17,8%	↑ 10,5%	↑ 05,3%	↓ 11,4%
<i>60/85 + CD</i>	↑ 01,5%	↓ 14,1%	↓ 11,2%	↓ 03,3%	↓ 15,9%

Fonte: Bock (2012)

Tabela 7: Variação percentual das propriedades das misturas asfálticas em função da incorporação de cal e condicionamento das amostras (35°C)

<i>Propriedade (35°C)</i> <i>Mistura</i>	<i>RRT</i>	<i>Sem Cond.</i>		<i>Com Cond.</i>	
		<i>RT</i>	<i>MR</i>	<i>RT</i>	<i>MR</i>
<i>50/70 REF</i>				↓ 18,9%	↑ 06,0%
<i>50/70 + CC</i>		↑ 59,2%	↑ 95,7%	↑ 14,1%	↑ 24,0 %
<i>50/70 + CD</i>		↑ 34,7%	↑ 25,4%	↓ 03,1%	↓ 08,5%
<i>60/85 REF</i>				↓ 09,1%	↑ 09,7%
<i>60/85 + CC</i>		↓ 17,8%	↑ 52,5%	↑ 07,1%	↓ 14,1%
<i>60/85 + CD</i>		↓ 14,1%	↓ 04,6%	↓ 04,4%	↓ 22,3%

Fonte: Bock (2012)

2.5.2.1 Resistência à tração

- Misturas com ligante convencional:

Para a análise da influência promovida pela incorporação de cal e considerando uma mesma temperatura de ensaio, a mesma proporcionou um aumento significativo de RT para ambos os tipos de cal incorporada, demonstrando a ação benéfica de sua incorporação como fíler ativo, interagindo com os componentes da mistura e gerando um produto de desempenho superior.

Levando em consideração o condicionamento das amostras ficou evidenciado de forma bastante clara a ação positiva da cal nas misturas asfálticas após determinado período de exposição à condicionantes nocivos (ação deletéria da água e envelhecimento em estufa). Quando foi incorporada cal calcítica nas misturas, observaram-se aumentos significativos na resistência, e também não apresentando queda na resistência após processo de condicionamento.

E em geral, as misturas tratadas com cal apresentaram uma melhor manutenção de sua resistência na temperatura mais elevada (35°C), e o melhor desempenho neste quesito, foi das misturas tratadas com cal calcítica.

- Misturas com ligante modificado:

E ao contrário do que ocorreu nas misturas com ligante convencional, a incorporação de cal provocou uma diminuição de RT para ambos os tipos de cal.

Porém, a partir da comparação dos resultados das misturas com ligante convencional e ligante modificado (sem incorporação de cal) observa-se que as amostras com ligante convencional são mais suscetíveis ao processo de condicionamento. Essa diferença na perda de resistência deve-se provavelmente à influência dos modificadores elastoméricos na resistência à degradação das amostras.

Já considerando a ação da cal na manutenção das propriedades da mistura com a elevação da temperatura, a cal calcítica foi mais efetiva e cal dolomítica não apresentaram variações significativas em relação à Referência.

Valores bastante semelhantes de resistência retida foram observados entre misturas preparadas com ligante convencional e ligante modificado. Ao se levar em consideração o processo de condicionamento não foi observado uma diferença significativa nos resultados.

Concluindo sobre os resultados de RT das misturas analisadas, observou-se que em misturas com ligante modificado ocorreu o contrário do que com ligante convencional, em que a incorporação de cal na mistura proporcionou um aumento significativo de RT.

Misturas com cal dolomítica apresentaram uma menor queda de resistência. Este comportamento possivelmente deve-se a reações entre componentes químicos da cal e dos modificadores do ligante. Torna-se importante verificar o tipo de modificador empregado nos ligantes, podendo este ter influência na ação e na eficiência da cal hidratada nas misturas asfálticas.

2.5.2.2 Módulo de resiliência (MR)

- Misturas com ligante convencional:

Resultados obtidos com incorporação de cal calcítica proporcionaram um aumento de MR de praticamente 30%, e com cal dolomítica, os resultados foram muito semelhantes aos de misturas que não tiveram incorporação de cal, aumentos de MR foram inferiores a 2%.

Misturas nas quais não houve incorporação de cal apresentaram um aumento de módulo (enrijecimento) após o processo de condicionamento. Um fator importante a ser lembrado está relacionado com a variação da RT frente ao processo de condicionamento. Como foi visto anteriormente, ocorreu uma diminuição de resistência. Esta incompatibilidade entre rigidez (aumento) e resistência (diminuição) é um fator prejudicial, misturas asfálticas mais rígidas sem aumento de resistência para acompanhar este aumento de rigidez proporcionam um comportamento mais frágil, conseqüentemente há uma maior suscetibilidade ao trincamento.

Em misturas com incorporação de cal calcítica, ocorreram aumentos de MR devido ao processo de condicionamento, mas ao contrário do que ocorreu nas misturas de referência, as misturas com incorporação de cal calcítica além de apresentar um aumento significativo de MR também apresentaram um aumento de RT para acompanhar este aumento de rigidez, apresentando uma melhor compatibilização entre as duas propriedades.

Misturas com cal dolomítica não apresentaram variações significativas de MR. Ao realizar os ensaios a uma temperatura mais alta que a ambiente (35°C), as misturas de Referência tiveram uma queda de MR mais acentuada em relação às misturas com incorporação de cal.

No processo de condicionamento, as misturas com cal dolomítica mostraram influência positiva da cal, porém não tão acentuada como a calcítica, que apresentaram um aumento de MR. E misturas de referência e com cal dolomítica apresentaram queda.

Concluindo, algumas observações importantes são pertinentes, como a importância do tipo de cal incorporada às misturas. Misturas com cal calcítica apresentaram comportamento

diferenciado, principalmente no que diz respeito ao aumento de MR. Outra característica importante observada foi a capacidade das misturas com cal de manter o MR em temperaturas mais elevadas que a temperatura ambiente.

- Misturas com ligante modificado:

No que diz respeito ao Módulo de Resiliência de misturas com ligante modificado (CAP 60/85), o efeito da incorporação de cal não foi muito significativo. Aumentos da ordem de 10% foram obtidos com cal calcítica, resultados bem inferiores aos aumentos de MR obtidos com ligante convencional (quase 30%).

Ao analisar o comportamento de misturas com cal dolomítica verificaram-se diminuições de MR configurando em um aumento de flexibilidade da mistura. Conforme visto anteriormente na análise de RT das misturas com ligante modificado, ocorreu uma diminuição de resistência para ambas as misturas com incorporação de cal.

Ao simular o envelhecimento das amostras através do processo de condicionamento surgiram comportamentos distintos entre as misturas analisadas. As misturas com cal, tanto calcítica quanto dolomítica apresentaram reduções de MR.

Quando não há incorporação de cal ocorreu um aumento de rigidez discreto para a temperatura de 25°C, demonstrando uma mistura menos suscetível ao processo de condicionamento quando comparado com as misturas com ligante convencional, que apresentaram um aumento de MR em função deste mesmo processo, seguido de queda significativa de RT (queda duas vezes maior). Misturas com cal calcítica apresentaram um comportamento diferenciado, com diminuição de MR (mais flexíveis) e aumento de RT, enquanto misturas sem cal se tornaram mais frágeis, com aumento de MR e diminuição de RT. Misturas com cal dolomítica apresentaram queda de MR e também de RT.

Assim como nos resultados de RT, valores bastante semelhantes de módulo retido foram observados entre misturas preparadas com ligante convencional e ligante modificado. Ao se levar em conta o processo de condicionamento não foi observado uma diferença significativa.

A queda de resistência observada nas misturas com ligante modificado pode estar relacionada ao fato de que já se tenha chegado a um “pico” de melhorias proporcionadas pelo modificador incorporado e o acréscimo de mais um modificador não é capaz de proporcionar melhorias adicionais nas propriedades da mistura, pois comparando com as misturas com ligante convencional, quando têm-se misturas com ligante modificado já parte-se de outro

patamar, com resistência bem mais elevada. Um possível excesso pode estar provocando este comportamento. Além disso, ainda tem-se a hipótese de que possíveis reações de neutralização da cal pelo agente modificador do ligante asfáltico levam a este comportamento diferenciado quando comparado com o que ocorreu com ligante convencional (acréscimo de resistência e módulo).

Ao comparar os resultados de misturas preparadas com ligante modificado (Referência 60/85) e misturas preparadas com ligante convencional com incorporação de cal calcítica (Cal calcítica 50/70) (Figura 37), nota-se um considerável aumento no desempenho da mistura com incorporação de cal. Somente o simples fato de incorporar 1% de cal na mistura com ligante convencional proporcionou um aumento na resistência de praticamente 20%. A mistura que antes apresentava RT 12% inferior, agora passa a ser mais resistente que a mistura com ligante modificado.

E de forma geral, observa-se uma tendência de fragilização das amostras com ligante modificado (aumento de rigidez e queda de resistência) com o processo de condicionamento ao qual foram submetidas. Por outro lado, as misturas com incorporação de cal apresentaram um aumento significativo de rigidez, porém acompanhado de um aumento de resistência para evitar essa tendência à fragilização que ocorreu nas misturas anteriormente analisadas. Abre-se possivelmente, uma nova alternativa na busca por pavimentos com melhor desempenho e durabilidade: modificar a mistura através da incorporação de cal hidratada de boa qualidade ao invés de modificar o ligante asfáltico. Nesta mudança de processo tem-se alguns fatores benéficos adicionais, tais como temperaturas mais baixas de usinagem proporcionadas pelo ligante convencional, economia de energia na usinagem e na energia utilizada na modificação do ligante, além disso pode-se dispor de revestimentos mais resistentes à degradação.

2.5.2.3 Avaliação das Deformações Permanentes através de Creep Dinâmico

O ensaio acontece da seguinte maneira: aplica-se um período de condicionamento: 200 ciclos de carregamento + 400 segundos de recuperação e período de ensaio: 3600 ciclos de carregamento + 900 segundos de recuperação à tensão de 0,70 MPa (100 psi) e frequência de 1Hz.

Com uma forma ainda bastante genérica de análise, pôde se destacar alguns aspectos como: distinção entre misturas com ligante convencional e ligante modificado, onde as misturas com ligante modificado apresentam uma maior resistência à deformação; a incorporação de cal nas misturas aumenta a resistência à deformação das misturas, sendo essa

variação mais pronunciada em misturas com ligante convencional; incorporação de cal calcária (CC) proporciona uma maior resistência à deformação do que misturas com cal dolomítica (CD), quando analisadas para o mesmo tipo de ligante utilizado.

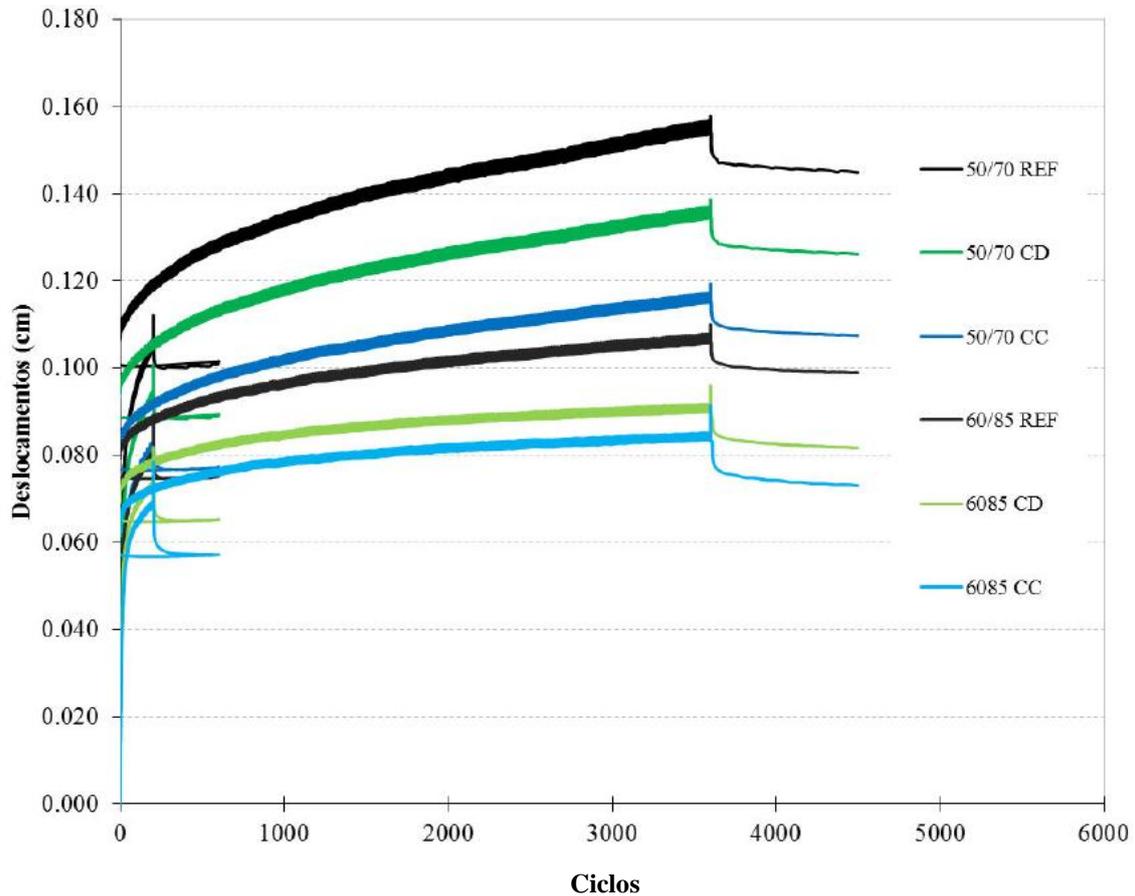


Figura 13: Deslocamentos obtidos para as misturas ensaiadas

Fonte: Bock (2012)

Os valores dos deslocamentos (DL) são obtidos em centímetros e posteriormente transformados em deformações (DF) através da divisão deste valor pela distância inicial entre os suportes dos LVDTs que é de 4 cm ($DF = DL/4 * 100$). Os valores das deformações serão divididos e analisados separadamente nos próximos três itens, sendo eles: deformações totais, Permanentes e Recuperáveis.

- Deformações totais:

As deformações totais correspondem às deformações ocorridas no período inicial de condicionamento onde são aplicados 200 ciclos de cargas, para acomodação do sistema e

amostra (Inicial), e as deformações ocorridas no ensaio propriamente dito, período de 3600 ciclos de carregamento (Ensaio).

O somatório dessas duas parcelas não corresponde diretamente às deformações totais sofridas pela amostra (Total). É importante lembrar que a parcela de recuperação que ocorre no período denominado na metodologia de “descanso de condicionamento” de 400 segundos para recuperação das deformações iniciais é considerada, iniciando-se a medição da deformação de “Ensaio” a partir do ponto final dessa recuperação, por este fato o somatório das parcelas “Inicial” e “Ensaio” não condizem com o valor de deformação “Total” que é inferior a esta soma devido à recuperação no período de condicionamento.

As misturas com incorporação de cal, tanto calcítica quanto dolomítica apresentaram menores valores totais de deformação. Considerando as deformações iniciais e as deformações de ensaio este comportamento se mantém, com exceção da mistura com cal dolomítica e ligante convencional que apresentou uma deformação de ensaio maior do que a deformação da amostra de referência.

A presença e o tipo de cal nas misturas também influenciam as deformações. A presença de cal calcítica, foi capaz de reduzir o valor das deformações em amostras com ligante convencional (0,94%) e em amostras com ligante modificado também foi reduzido (0,60%) e para a presença de cal dolomítica, estes valores caem pela metade.

Analisando separadamente a influência do tipo de ligante, misturas com ligante modificado apresentaram deformações totais 1,16% menores quando comparadas com misturas com ligante convencional, em misturas com cal calcítica este valor fica em 0,82% e misturas com cal dolomítica em 1,10%.

- Deformações permanentes:

As deformações sofridas pelas amostras no período inicial de condicionamento para acomodação da amostra e do sistema foram maiores do que as deformações sofridas durante o ensaio propriamente dito (3600 ciclos).

As deformações permanentes foram maiores em misturas sem incorporação de cal (REF), misturas com cal dolomítica (CD) apresentaram valores intermediários, e os menores valores foram encontrados quando se fez incorporação de cal calcítica (CC). Independentemente do ligante utilizado.

- Deformações recuperáveis:

A capacidade de se deformar com a passagem do tráfego e depois recuperar essa deformação sofrida é uma propriedade importante a ser analisada em misturas asfálticas. A seguir será analisada esta característica para as misturas com e sem incorporação de cal para os dois tipos de ligantes empregados em sua composição.

As deformações permanentes ocorreram em sua grande maioria no período inicial de condicionamento (aproximadamente 70%), observa-se que neste período o percentual de recuperação é menor quando comparado com a recuperação elástica que ocorre após o período de ensaio (após os 3600 ciclos considerando toda a deformação sofrida até o momento) na maioria das misturas analisadas.

Somente em misturas com ligante modificado e incorporação de cal calcítica estes valores se invertem, ou seja, ocorre uma recuperação maior no período de condicionamento ao invés de ocorrer no período de ensaio como ocorre com o restante das misturas. Para o mesmo ligante e incorporação de cal dolomítica estes valores são praticamente iguais.

Quando se desconsidera o período de condicionamento e passa-se a considerar somente as deformações provocadas durante os 3600 ciclos de carregamento, os valores do percentual de recuperação são mais elevados.

Ao considerar misturas com o mesmo tipo de ligante os maiores percentuais de recuperação ocorrem para misturas com incorporação de cal, sendo ligeiramente mais elevados para misturas com cal calcítica para misturas com ligante convencional.

Recuperações maiores ocorreram em misturas com ligante modificado quando comparadas com recuperações com ligante convencional. Neste caso os maiores valores de recuperação elástica também foram obtidos com cal calcítica em relação às misturas de referência (sem cal).

De forma geral a incorporação de cal hidratada favoreceu as misturas asfálticas tornando-as menos suscetíveis à deformação permanente, configurando misturas com maior poder de recuperação elástica.

2.5.3 Aplicação da metodologia UCL® para verificação da influência da cal hidratada nas misturas asfálticas

Este procedimento de ensaio tem por objetivo caracterizar o poder de coesão dado por uma determinada quantidade de ligante a uma mistura padrão de agregados. Este procedimento ainda está dentro dos estudos realizados por Bock (2012).

Tabela 8: Principais características das misturas Metodologia UCL

<i>Mistura</i>	<i>Concentração Crítica Cs</i>	<i>Quantidade de Fíler (g)</i>	<i>Quantidade de Fíler (%)</i>	<i>Volume de Vazios Médio (%)</i>	<i>Massa Esp. Aparente (g/cm³)</i>
<i>50/70 REF</i>	-	0	0	29,36	1,767
<i>50/70 + CC</i>	0,2604	7,27	0,81	28,45	1,770
<i>50/70 + CD</i>	0,2379	7,09	0,79	28,32	1,772
<i>60/85 REF</i>	-	0	0	27,61	1,821
<i>60/85 + CC</i>	0,2604	7,17	0,80	27,15	1,825
<i>60/85 + CD</i>	0,2379	7,00	0,78	26,95	1,828

Fonte: Bock (2012)

Um dos principais resultados que se obtém através da aplicação da Metodologia UCL® é a curva de estado, que nada mais é do que a porcentagem de perda por abrasão que sofre uma amostra em função da temperatura de condicionamento. Através das curvas de estado de diferentes misturas, definem-se diferenças no comportamento provocadas pelo tipo de ligante ou pelo tipo de fíler que compõe o mástique da mistura.

Sabe-se que a variação da viscosidade do ligante asfáltico com a temperatura implica também em variações na coesão que o mesmo proporciona à mistura, que é definida aqui pela resistência à perda por desgaste que a mistura apresentará no ensaio cantabro.

Nos gráficos a seguir são apresentadas as curvas de estado de seis misturas analisadas neste estudo. Duas misturas de referência (sem mástique, pois não há incorporação de fíler, são elas 50/70 REF e 60/85 REF), e quatro misturas com mástique, sendo duas misturas com ligante convencional e adição de cal calcítica (CC) e dolomítica (CD) (50/70+CC e 50/70+CD) e duas misturas com ligante modificado e incorporação de cal (60/85+CC e 60/85+CD).

Analisando as curvas de estado das misturas formuladas nesta pesquisa observam-se perdas de massa mais acentuadas em temperaturas mais baixas (5°C) em função da manifestação de um comportamento frágil do ligante asfáltico. Em temperatura ambiente (25°C) as perdas são menores em função do comportamento elastoplástico, já em temperaturas mais elevadas (a partir de 45°C) as misturas começam a apresentar novamente um incremento das perdas devido à inconsistência.

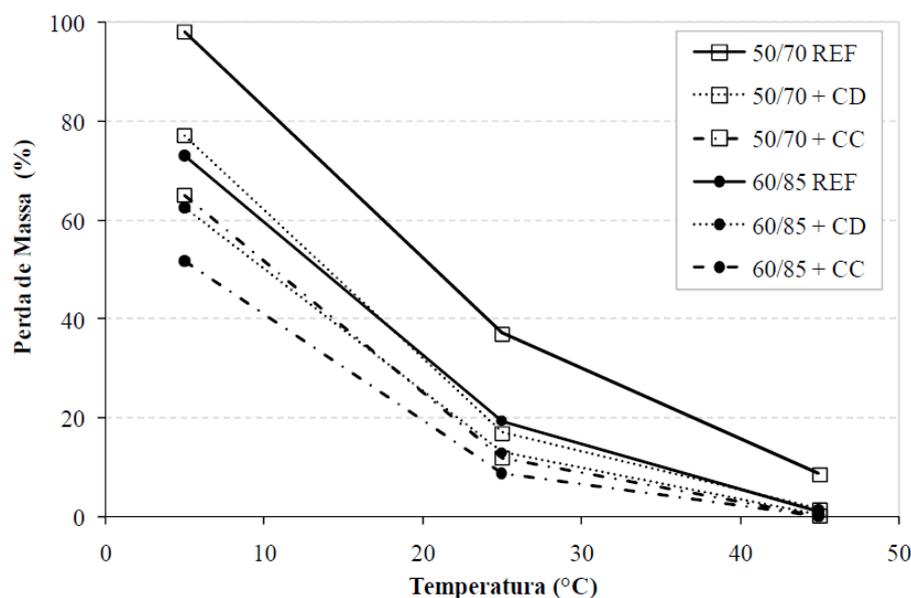


Figura 14: Curvas de estado das misturas com ligante convencional CAP 50/70 e com ligante modificado CAP 60/85 (%)

Fonte: Bock (2012)

As misturas com mástique asfáltico formado pela incorporação de cal na mistura apresentam um maior poder de coesão (maior resistência ao desgaste) do que as misturas sem nenhuma incorporação de fíler, demonstrando que essa parcela contribui de maneira significativa na resistência à degradação da mistura.

Ao analisar a influência do tipo de ligante, percebemos claramente que o ligante modificado por polímero (CAP 60/85-E) tem a capacidade de gerar um maior poder coesivo à mistura quando comparado com o ligante convencional (CAP 50/70), tanto na fase pura quanto em forma de mástique (ligante + cal). E essa diferença de comportamento se pronuncia quanto mais baixa for a temperatura.

E quando houve incorporação de cal, essa diferença de comportamento quando utilizado diferentes ligante diminuiu. A adição de cal obteve melhores ganhos com o ligante modificado, e dentre os dois tipos de cal, a calcítica teve comportamento superior a cal dolomítica em todos os casos. A incorporação da cal na mistura teve melhor desempenho quanto mais baixa era a temperatura ensaiada.

Quando a cal calcítica era incorporada, o desempenho das misturas com ligante convencional passa a ser significativamente melhor em relação às misturas com ligante modificado (sem incorporação de cal), mistura essa a qual teve coesão próxima a mistura com cal dolomítica e ligante convencional.

Outro procedimento realizado por Bock (2012) também é parte integrante da metodologia UCL® e tem por objetivo determinar a perda de massa antes e após processo de condicionamento por imersão das amostras. Portanto, avaliando a adesividade do ligante no agregado.

O processo de condicionamento adotado consiste na imersão em água a 60°C por um período de 24 horas e posterior estabilização em água a 25°C por um período de 12 horas. Os ensaios foram realizados após um período de estabilização a seco de 12 horas a 25°C.

Tanto as misturas de referência, quanto as misturas com incorporação de cal tiveram perdas depois do processo de condicionamento por imersão. As amostras com ligante convencional e sem cal não resistiram nem ao condicionamento. Já as com cal resistiram ao condicionamento, mas se desmancharam quando da realização do ensaio.

Nas misturas com ligante modificado (CAP 60/85), o comportamento foi melhor na mistura com cal calcítica, seguido da mistura com cal dolomítica e por último a mistura de referência.

2.6 MATERIAIS PARA EXECUÇÃO DE MISTURAS ASFÁLTICAS

2.6.1 Agregados

Material sem forma ou volume definido, geralmente inerte, de dimensões e propriedades adequadas para produção de argamassa e concreto (NBR 9935/87).

Bernucci et al (2006) diz que as propriedades geológicas do agregado estão diretamente ligadas ao seu desempenho. Dentre as propriedades estão: composição mineralógica, tipo de rocha, composição química, granulação, tendência a degradação, abrasão ou fratura sob tráfego e o potencial de adesão do ligante asfáltico em sua superfície.

Outra propriedade muito importante do agregado é a quantidade de sílica presente. Ela dita a adesividade entre o agregado e o ligante asfáltico, quanto mais ácido é o material menos adesivo ele é, que é o caso de quartzos, arenitos e cascalhos. Já materiais básicos como dolomitas são extremamente adesivos.

Tabela 9: Classificação do agregado quanto a quantidade de Sílica presente

Classificação	%Sílica
Ácida	> 65
Neutra	52 a 65
Básica	45 a 52
Ultrabásica	< 45

Fonte: Bernucci et al (2006)

Porém, os termos ácido e básico não possuem ligação com os utilizados na química, e estão relacionados com a carga elétrica superficial do agregado.

A falta de adesividade do agregado ao ligante asfáltico está condicionada a presença de água, e de acordo com Bernucci et al (2006) classifica-se este agregado como hidrófilo. Já no caso contrário, agregados com alta adesividade na presença de água, são denominados hidrofóbicos, e mais indicados para a utilização em misturas asfálticas. Ensaio que trata desta propriedade são:

- a) DNER-ME 078/94: baseia-se na avaliação visual da mistura asfáltica não compactada imersa em água;
- b) ASTM D 1075: são comparadas a resistência à compressão simples de amostras idênticas sem imersão e após a imersão em água a 50 °C por 24 horas;
- c) AASHTO T 283 e ABNT NBR 15617 (Lottmann modificado): são comparadas a resistência à tração por compressão diametral à temperatura de 25 °C de amostras idênticas sem e após o processo de imersão em água e congelamento a baixas temperatura.

2.6.2 Ligantes asfálticos convencionais

Os asfaltos nada mais são que hidrocarbonetos, de origem da destilação do petróleo, de alto e baixo peso molecular, os de alto peso molecular são os asfaltenos. E ainda possui na sua composição as resinas, que são quem possibilita a aderência aos agregados por meio de adsorção (Vinha, 1975).

O asfalto convencional, mais comumente utilizado em pavimentação, é o 50/70, cuja própria refinaria Petrobras S.A., acusa apresentar deficiência de adesividade (química) com agregados minerais de característica iônica ácida, sendo necessário ser aditivado com melhoradores de adesividade (dopes).

2.6.3 Ligantes asfálticos modificados

Quando os asfaltos convencionais não suprem as exigências de condições adversas, os asfaltos modificados por polímeros são ótimas opções, além ainda de diminuir a frequência de manutenções. São classificados de acordo com o seu comportamento em relação a variações térmicas em:

- a) Termorrígidos: aqueles que não se fundem;
- b) Termoplásticos: se fundem, mas só se tornam maleáveis reversivelmente quando aquecidos;
- c) Elastômeros: se decompõem antes de amolecer quando aquecidos;
- d) Elastômeros termoplásticos: elástico a baixa temperatura e termoelástico quando aquecidos.

Alguns desses modificadores são: Elastômeros, Plastômeros, Borracha de pneu, Negro-de-fumo, Cal, Enxofre, Modificadores químicos, Antioxidante, Melhorador de adesividade, Cal Hidratada.

Os asfaltos modificados por polímeros são obtidos a partir da incorporação do polímero aos cimentos asfálticos que se prestam à modificação, ou seja, são aqueles que apresentam compatibilidade com o polímero a ser empregado. Os polímeros mais amplamente utilizados na modificação de asfaltos, para fins rodoviários são: SBS (estireno-butadieno-estireno), SBR (borracha de butadieno estireno) e EVA (copolímero de estileno acetato de vinila).

Os polímeros (SBS) quando adicionados ao asfalto podem alterar profundamente o comportamento reológico do asfalto, melhorar as propriedades mecânicas, numa grande faixa de temperatura. E complementa ainda que suas principais vantagens são:

- a) Diminuição da suscetibilidade térmica;
- b) Melhoria das características adesivas e coesivas;
- c) Aumento da resistência ao envelhecimento;
- d) Elevação do ponto de amolecimento;
- e) Diminuição do ponto de ruptura Fraass;
- f) Maior resistência à deformação permanente.

2.6.4 Cal Hidratada

A cal hidratada não é apenas um melhorador de adesividade, ela também auxilia na redução do afundamento de trilha de roda, diminui o trincamento e envelhecimento (oxidação) do ligante (Little e Epps, 2001) e aumenta a vida útil da mistura asfáltica, aliado a viabilidade econômica (Hicks e Scholz, 2001).

De acordo com Little et al (2006), ao mesmo tempo em que age sobre o agregado, a cal também reage com as partículas polarizadas do asfalto, evitando que estas formem sabões solúveis em água, o que causaria a perda de adesividade. A dispersão de pequenas partículas de cal hidratada na mistura torna-a mais rígida e dura, reduzindo a possibilidade de ruptura mecânica da ligação entre o CAP e o agregado, mesmo na ausência de água. Este enrijecimento do ligante, que acontece a altas temperaturas, e é provocado pela atividade química da cal, torna-o mais resistente a deformação permanente e a fadiga. Não afetando o ligante a baixas temperaturas, pois a cal torna-se inerte.

Já as moléculas polarizadas do ligante (que quando em contato com o meio ambiente se rompem) reagem com o hidróxido de cálcio, presente na cal, evitando o rompimento e a gradativa fragilização do pavimento, causador do envelhecimento. Além do trincamento por envelhecimento, a cal reduz o trincamento por fadiga, pois, quando em contato com as moléculas polarizadas do ligante asfáltico, o volume efetivo das partículas de cal aumenta e dessa forma desviam as micro-fissuras causadoras do trincamento por fadiga.

Núñez et al (2007), concluíram que as melhorias das propriedades mecânicas dependem significativamente da qualidade da cal. Cales com baixos teores de Ca(OH)_2 não produzirão tais efeitos benéficos. Dizem ainda que um teor de Ca(OH)_2 da ordem de 90% (cal calcítica) parece ser suficiente para otimizar a mistura asfáltica em termos de módulo de resiliência, resistência à tração e adesividade. Também dizem que o emprego de cal hidratada é muito adequado em pavimentos de elevado desempenho, constituindo as camadas superiores dos mesmos, sujeitas a elevadas tensões de compressão (risco de afundamento nas trilhas de rodas), associada a camadas subjacentes mais flexíveis.

Já na pesquisada realizada por Bock et al (2009), observa-se que a adição de cal calcítica, com elevado teor de hidróxido de cálcio, altera de maneira substantiva e positiva as propriedades das misturas tipo concreto asfáltico; as formas de incorporação de cal na mistura que tratam com cal o agregado graúdo são as mais eficientes. Ainda o mesmo autor diz que a prática atual de adição de cal como melhorador de adesividade na forma de filler, prática corrente no Brasil, não foi a forma mais satisfatória de adição.

3 EQUIPAMENTOS, MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são descritos os procedimentos de ensaio, os equipamentos e materiais utilizados, os ensaios de fadiga por compressão diametral e da análise mecanística realizada com os dados deste mesmo ensaio, e do ensaio que compuseram a avaliação dos métodos de adição de cal em misturas asfálticas.

Todos os ensaios foram realizados para seis misturas diferentes, cujo o traço destas projetos foram realizados por Bock (2012), visto que esta dissertação ser complementar a mesma, e os materiais são exatamente os mesmos. São elas:

- a) Mistura CS: Misturas asfálticas com ligante convencional (50/70) e sem cal;
- b) Mistura CC: Misturas asfálticas com ligante convencional (50/70) e cal Calcítica;
- c) Mistura CD: Misturas asfálticas com ligante convencional (50/70) e cal Dolomítica;
- d) Mistura MS: Misturas asfálticas com ligante modificado (60/85) e sem cal;
- e) Mistura MC: Misturas asfálticas com ligante modificado (60/85) e cal Calcítica;
- f) Mistura MD: Misturas asfálticas com ligante modificado (60/85) e cal Dolomítica.

A mistura dos materiais que geraram a mistura asfáltica foi feita dentro de uma cuba térmica de 10L, onde eram preparados três corpos-de-prova por vez e cada corpo-de-prova recebeu três camadas da mistura acomodada com bastão de cobre. A compactação destas misturas foi procedida com equipamento mecânico de compactação por impacto com 75 golpes em cada face da amostra. A desmoldagem ocorreu 24h após a compactação. Todo o procedimento ocorreu no Laboratório de Pavimentação (LPAV) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS).

A dosagem das misturas asfálticas e a moldagem das amostras se utilizaram da metodologia Marshall (DNER – ME 043/95 e DAER/RS – ES – 16/98). O concreto asfáltico foi projetado seguindo as recomendações do Asphalt Institute (1995) e de acordo com ASTM D6926-04 e ASTM D 6927-05; o volume de vazios (VV) adotado foi de 4% como critério de dosagem.

A composição granulométrica da mistura foi enquadrada próximo ao centro da faixa “C” do DNIT (Figura 9), com tamanho máximo de granulares de 19 mm.

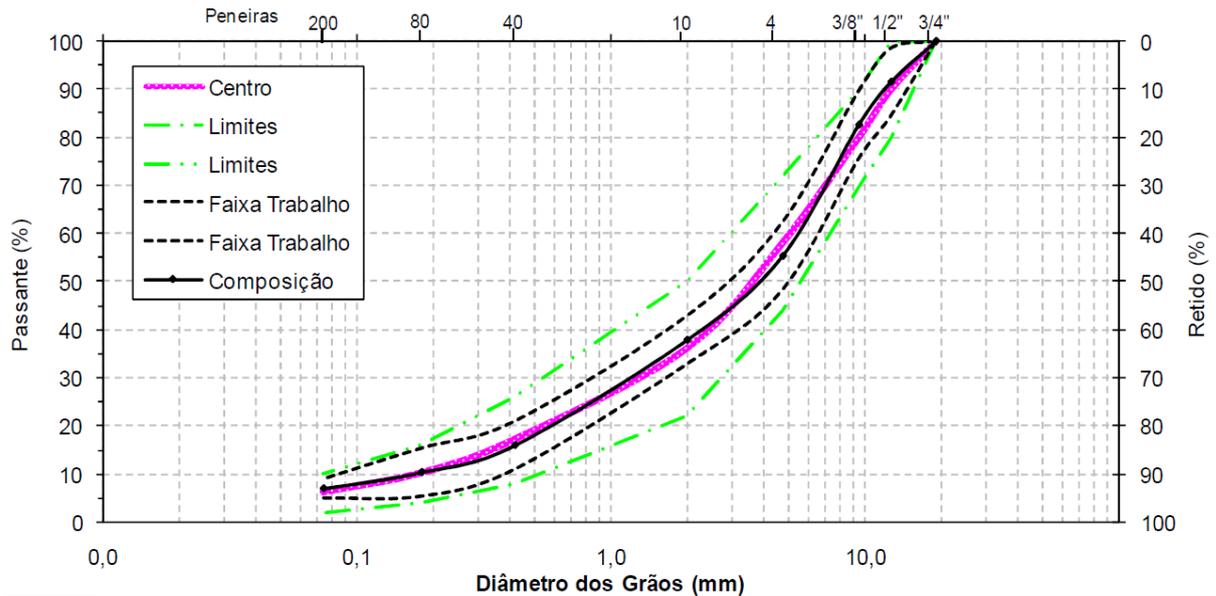


Figura 15: Composição granulométrica adotada no estudo - Faixa C DNIT

Fonte: Bock (2012)

3.1 MATERIAIS UTILIZADOS

Os ligantes utilizados foram ligantes: convencional e modificado. O ligante modificado, é um ligante modificado por polímeros elastoméricos com recuperação elástica de 87,75%. O ligante convencional se trata de um CAP 50/70. A caracterização dos ligantes foi feita por Bock (2012), tanto dos ligantes asfálticos, bem como agregados e cales.

Tabela 10: Propriedades do ligante convencional - CAP 50/70(ANP, 2005)

<i>Propriedade</i>	<i>Método</i>	<i>CAP 50/70</i>	
		<i>Especificação</i>	<i>Resultado</i>
<i>Ponto de amolecimento (°C)</i>	<i>NBR 6560</i>	46 min.	46,75
<i>Penetração (0,1 mm)</i>	<i>NBR 6576</i>	50 - 70	57,6
<i>Visc. Brookfiel 135°C (cp)</i>	<i>NBR 15184</i>	274 min.	387
<i>Visc. Brookfiel 150°C (cp)</i>	<i>NBR 15184</i>	112 min.	154
<i>Visc. Brookfiel 177°C (cp)</i>	<i>NBR 15184</i>	57 a 285	75
<i>Ductilidade (cm)</i>	<i>NBR 6293</i>	60 min.	>147
<i>Massa Específica (g/cm³)</i>	<i>DNER – M 16/64</i>	---	1,013
<i>Ponto de Fulgor (°C)</i>	<i>NBR 11341</i>	235 min.	>236

Fonte: Bock (2012)

Tabela 11: Propriedades do ligante modificado - CAP 60/85 (ANP, 2010)

<i>Propriedade</i>	<i>Método</i>	<i>CAP 60/85-E</i>	
		<i>Especificação</i>	<i>Resultado</i>
<i>Ponto de amolecimento (°C)</i>	<i>NBR 6560</i>	60 min.	64,25
<i>Penetração (0,1 mm)</i>	<i>NBR 6576</i>	40 - 70	47,33
<i>Visc. Brookfiel135°C (cp)</i>	<i>NBR 15184</i>	3000 máx.	1350
<i>Visc. Brookfiel150°C (cp)</i>	<i>NBR 15184</i>	2000 máx.	510
<i>Visc. Brookfiel175°C (cp)</i>	<i>NBR 15184</i>	1000máx.	233
<i>Ductilidade (cm)</i>	<i>NBR 6293</i>	---	---
<i>Massa Específica (g/cm³)</i>	<i>DNER – M 16/64</i>	---	1,019
<i>Ponto de Fulgor (°C)</i>	<i>NBR 11341</i>	235 min.	>296

Fonte: Bock (2012)

Já os agregados pétreos são de origem basáltica, provenientes do município de Santo Antônio da Patrulha/RS. E as cales são provenientes do Estado de Minas Gerais (Cal calcítica) e do Rio Grande do Sul (Cal Dolomítica). O Rio Grande do Sul não produz cales calcíticas (altos teores de Ca(OH)₂, parâmetro o qual Little et al (2006) cita ser melhorador de adesividade de misturas asfálticas). A forma de adição da cal foi diretamente ao agregado graúdo seco previamente a moldagem da mistura asfáltica.

Tabela 12: Propriedades dos agregados pétreos utilizados

<i>Propriedade</i>	<i>Método</i>	<i>Agregado Graúdo</i>	<i>Agregado Miúdo</i>
<i>Absorção</i>	DAER/RS-EL 105/01	1,17%	---
<i>Massa Esp. Real do Grão</i>	DAER/RS-EL 105/01	2829 kg/m ³	2835 kg/m ³
<i>Massa Esp. Ap. do Grão</i>	DAER/RS-EL 105/01	2745 kg/m ³	---
<i>Índice de Lamelaridade</i>	DAER/RS-EL 108/01	28,3	---
<i>Desgaste à Abrasão</i>	DAER/RS-EL 103/01	28%	---

Fonte: Bock (2012)

Tabela 13: Distribuição granulométrica dos agregados e cales utilizados

<i>Peneira</i>	<i>mm</i>	<i>Brita 3/4"</i>	<i>Brita 3/8"</i>	<i>Pó-de-pedra</i>	<i>Cal Calcítica</i>	<i>Cal Dolomítica</i>
<i>3/4"</i>	<i>19,10</i>	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
<i>1/2"</i>	<i>12,70</i>	65,90	100,00	100,00	100,00	100,00
<i>3/8"</i>	<i>9,50</i>	30,30	100,00	100,00	100,00	100,00
<i>n 4</i>	<i>4,76</i>	1,00	43,10	99,90	100,00	100,00
<i>n 10</i>	<i>2,00</i>	0,70	3,20	91,30	100,00	100,00
<i>n 40</i>	<i>0,42</i>	0,70	1,90	37,70	100,00	100,00
<i>n 80</i>	<i>0,18</i>	0,60	1,80	23,80	99,60	99,30
<i>n 200</i>	<i>0,07</i>	0,60	1,60	15,50	95,45	88,10

Fonte: Bock (2012)

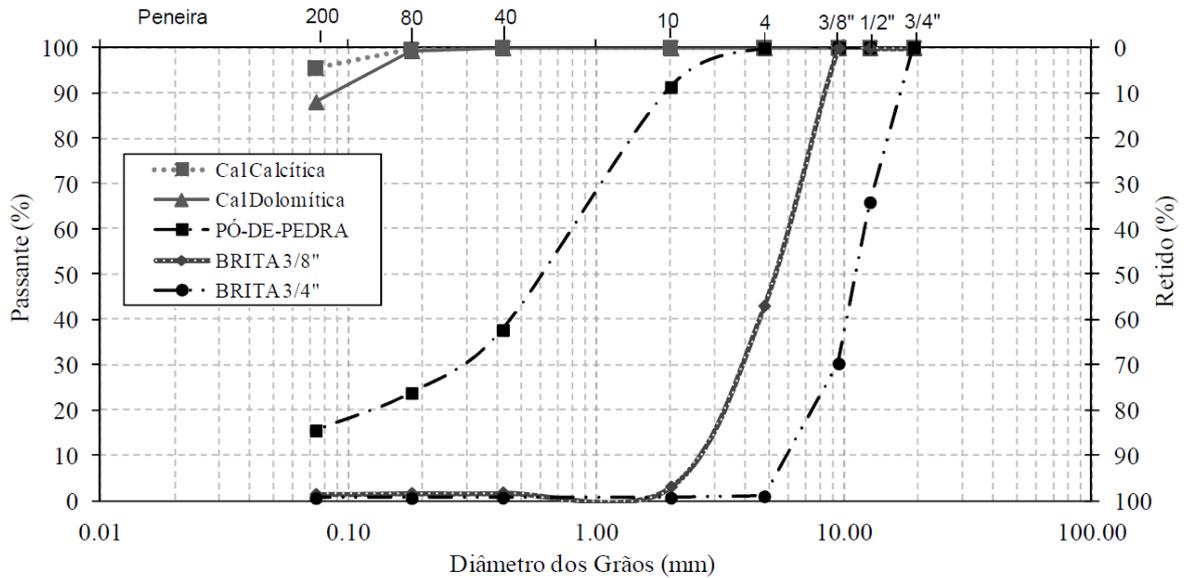


Figura 16: Distribuição granulométrica das cales e agregados utilizados no estudo

Fonte: Bock (2012)

Tabela 14: Características físicas das cales utilizadas

<i>Característica</i> <i>Tipo</i>	<i>Pss #200</i> <i>(%)</i>	<i>Massa Específica</i> <i>Aparente Solta</i> <i>(g/cm³)</i>	<i>Massa Específica</i> <i>Real (g/cm³)</i>
<i>Cal Calcítica</i>	95,45	0,496	2,239
<i>Cal Dolomítica</i>	88,10	0,546	2,320

Fonte: Bock (2012)

Tabela 15: Características químicas das cales utilizadas

<i>Característica (%)</i>	<i>Calcítica</i>	<i>Dolomítica</i>
<i>Perda ao fogo (1000 ± 50°)</i>	23,5	23,9
<i>Óxido de cálcio (CaO)</i>	71,2	41,3
<i>Óxido de magnésio (MgO)</i>	0,5	27,7
<i>Resíduo insolúvel (SiO₂)</i>	2,3	6,1
<i>Óxidos de ferro e alumínio (Fe₂O₃ e Al₂O₃)</i>	1,1	1,1
<i>Óxido de cálcio (CaO) disponível</i>	63,1	35,1

Fonte: Departamento de Química do CIENTEC – Fundação de Ciência e Tecnologia

3.2 ENSAIO DE FADIGA POR COMPRESSÃO DIAMETRAL

Os ensaios de fadiga foram realizados pela aplicação de compressão diametral em corpos-de-prova cilíndricos com diâmetro de 101,6 mm e altura de aproximadamente 64 mm moldados pela metodologia Marshall. O equipamento utilizado aplica tração indireta por compressão diametral cíclica. Para calibração do equipamento foi utilizado um corpo-de-prova cilíndrico em aço. Antes de executar o ensaio foram determinadas as resistências à tração característica de cada uma das seis (06) misturas testadas.

O sistema utilizado para a realização dos ensaios foi pneumático (Figura 11), com carregamento de topo em pórtico fechado composto por uma base rígida e viga de reação regulável presa à base por meio de hastes (Figura 12), instalado dentro de uma câmara termo-regulável (Figura 13) com precisão de 0,1 °C. O tipo de onda é senoidal semi-verso. Os frisos de carregamento possuem 12,3mm, base inferior fixa e base superior móvel conectada às hastes-guia por meio de buchas metálicas lubrificadas.



Figura 17: Apresentação do equipamento de fadiga por compressão diametral, com o sistema de controle da pressão do ar.



Figura 18: Apresentação do equipamento de fadiga por compressão diametral com o pórtico.



Figura 19: Apresentação do equipamento de fadiga por compressão diametral com câmara termo-regulável.

A montagem prosseguia da seguinte maneira: Colagem de peças de suporte para o LVDT com resina epóxi com no mínimo 24 horas de antecedência aos ensaios; Condicionamento em estufa à 25°C por 4 (quatro) horas; Fixação do LVDT junto às peças coladas no corpo-de-prova e regulagem do curso do LVDT com o auxílio do software; Posicionamento do corpo-de-prova sobre o pórtico de carregamento com o auxílio de um nível de bolha (Figura 15) para que o alinhamento da aplicação do carregamento fosse ortogonal ao sentido do LVDT (Figura 14); Liberação da contrapressão aplicada ao pórtico, liberando-o (Figura 16).

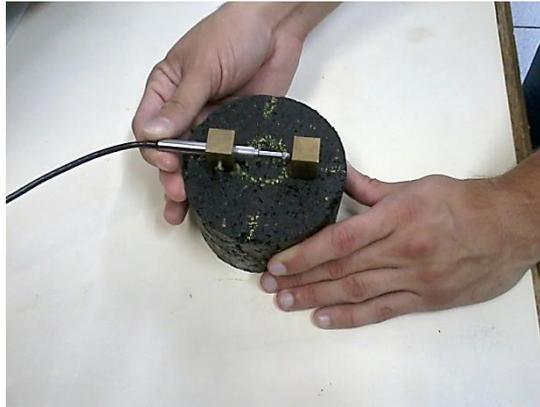


Figura 20: Passo-a-passo da montagem do ensaio, posicionamento do LVDT



Figura 21: Passo-a-passo da montagem do ensaio com nivelamento do CP



Figura 22: Passo-a-passo da montagem do ensaio com liberação da contrapressão

Os carregamentos foram aplicados sempre variando de acordo com um percentual da RT daquela mistura, variando de 10 em 10%, até 70% da RT. E a ruptura definida pelo número de ciclos que a mistura resistia, ou pela interrupção do ensaio quando a mistura chegava a 10^6 ciclos. O desempenho de materiais em fadiga normalmente é caracterizado pela "curva S-N", também conhecida como "curva de Wöhler", que é um gráfico de magnitude de

tensão (S) (ou diferença de tensões, neste caso) por número de ciclos (N) em escala logarítmica. Os dados coletados são:

Deformação específica inicial, a qual se trata da deformação inicial medida pelo LVDT pelo diâmetro do corpo-de-prova;

- a) Diferença de tensões;
- b) Tensão de tração.

3.3 ANÁLISE MECANÍSTICA DOS RESULTADOS OBTIDOS COM O ENSAIO DE FADIGA

Tanto para se mostrar como os resultados do ensaio de fadiga por compressão diametral podem ser utilizados, quanto para se mesurar qualitativamente os resultados obtidos pelo ensaio de fadiga foi realizada uma análise mecanística com os resultados dos ensaios de módulo de resiliência e de fadiga por compressão diametral. O software utilizado para a análise foi o EVERSTRESS 5.0. Software este produzido pelo Washington State Department of Transportation (WSDOT) e componente do pacote de softwares *Everseries Pavement Analysis Programs*. O programa é útil na determinação de tensões, deformações e deflexões sistema (semi-infinito) elástico de camadas sobre carregamento de superfícies circulares. O software pode analisar até cinco camadas, vinte carregamentos (estáticos) e cinquenta pontos de análise.

Optou-se por utilizar o EVERSTRESS, pois é um software consagrado e confiável. E apesar de não levar em conta elementos finitos, como sua versão posterior, ele gera maior número de dados.

Os dados ensaiados relativos ao carregamento são os que seguem. Optou-se pela utilização de dados padrões da configuração de carregamento de veículo padrão brasileiro:

Tabela 16: Configuração do carregamento utilizado na análise mecanística dos pavimentos ensaiado

Configuração do carregamento	Rodado duplo
Raio do rodado (cm)	10,80
Espaçamento entre os rodados (cm)	10,80
Carga (kN)	20,50
Pressão de inflação (kPa)	560

Quanto a configuração das camadas de pavimentos, foi utilizado uma configuração típica de pavimentos. Segue:

Tabela 17: Configuração das camadas dos pavimentos utilizados na análise mecanística dos ensaios

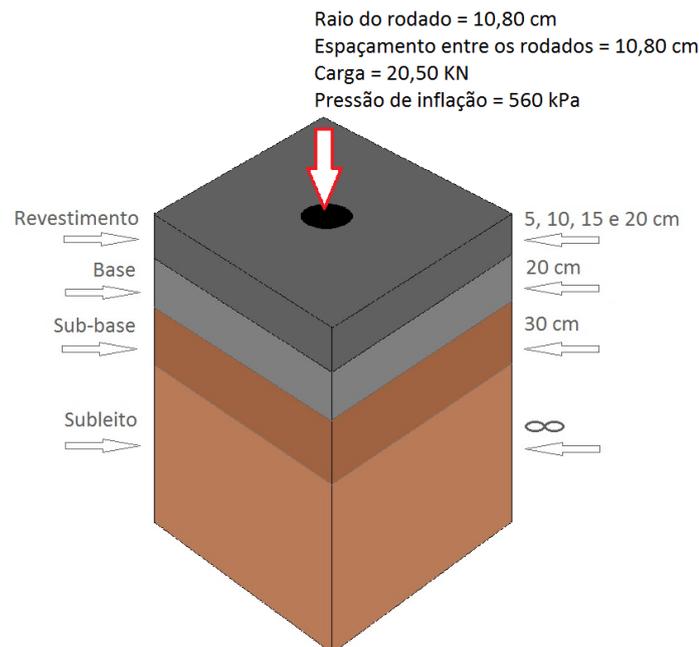
Camada	Coefficiente de Poisson	Espessura (cm)	Módulo de resiliência (MPa)
Revestimento	0,35	5, 10, 15 e 20	variável
Base	0,40	20	300
Subbase	0,40	30	200
Subleito	0,45	infinito	150

Os módulos de resiliência utilizados na simulação são provenientes de ensaios realizados por Bock (2012) em sua dissertação de mestrado. Foram utilizados esses módulos pelo fato das misturas ensaiadas serem exatamente as mesmas desta dissertação. Seguem:

Tabela 18: Módulos de resiliência utilizados na análise mecanística dos pavimentos ensaiados

Mistura/cal	Módulos de resiliência (MPa)
Convencional com cal calcítica	5768
Convencional com cal Dolomítica	4482
Convencional sem cal	4432
Modificado com cal calcítica	4149
Modificado com cal Dolomítica	3333
Modificado sem cal	3755

Os pontos do pavimento onde foram lidas as tensões, deformações e deflexões do pavimento se deram em todas as interfaces entre as camadas nos pontos abaixo do rodado e entre as mesmas.

Figura 23: Configuração dos pavimentos simulados no software *EVERSTRESS 5.0*

4 RESULTADOS

A seguir são apresentados os resultados da parte experimental da pesquisa e da análise mecânica baseados nos resultados do ensaio de fadiga por compressão diametral. Também são expostas as comparações entre os diferentes tipos de cales utilizadas, e os efeitos que o processo de marinação causa nas misturas em sua forma pura e com incorporação das diferentes cales hidratadas.

4.1 ENSAIOS DE FADIGA POR COMPRESSÃO DIAMETRAL

São apresentados os resultados dos ensaios de fadiga através das três curvas de Wöhler, são elas três: deformação específica inicial *versus* vida fadiga, tensão de tração *versus* vida de fadiga, diferença de tensões *versus* vida de fadiga. Dados estes que serão posteriormente modelados.

As figuras 24 a 26 apresentam o resultado dos ensaios em função da deformação específica no início do ensaio nas misturas com ligante convencional. Enquanto que as figuras 27 a 29 referem-se a ensaios com concretos asfálticos com ligante modificado.

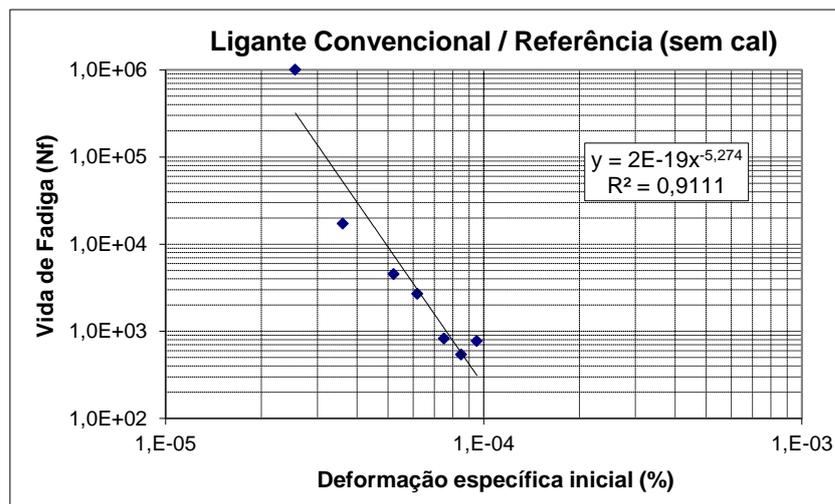


Figura 24: Curva de vida de fadiga *versus* deformação específica inicial (ϵ_i) para misturas de referência (sem cal) com ligante convencional.

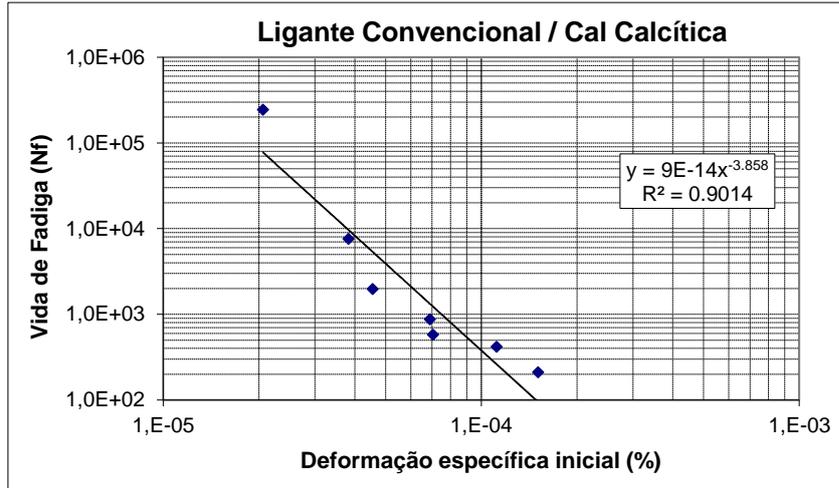


Figura 25: Curva de vida de fadiga *versus* deformação específica inicial para misturas com cal calcítica e ligante convencional.

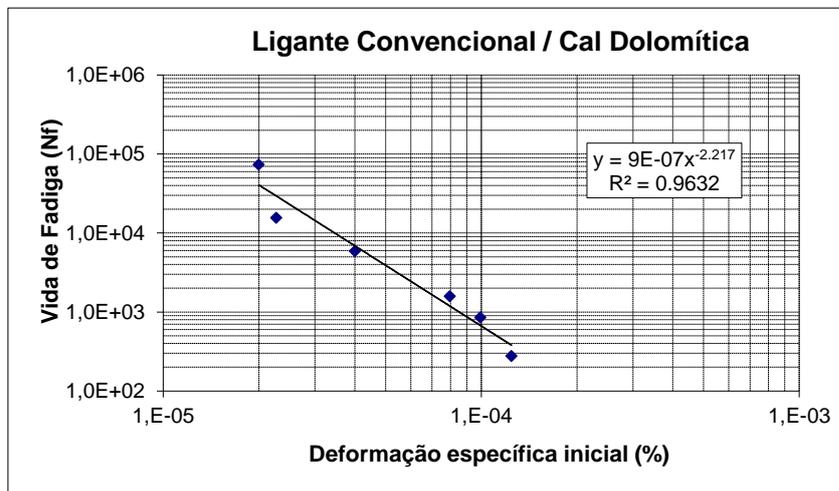


Figura 26: Curva de vida de fadiga *versus* deformação específica inicial para misturas com cal dolomítica e ligante convencional.

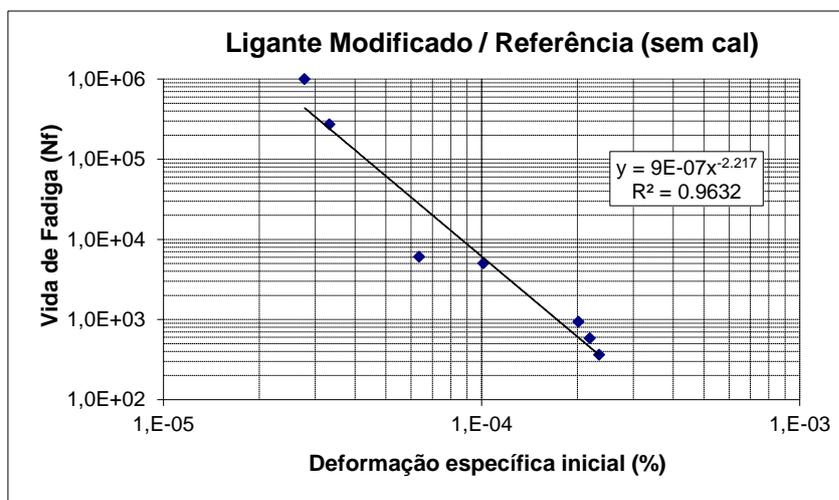


Figura 27: Curva de vida de fadiga *versus* deformação específica inicial para misturas de referência (sem cal) com ligante modificado.

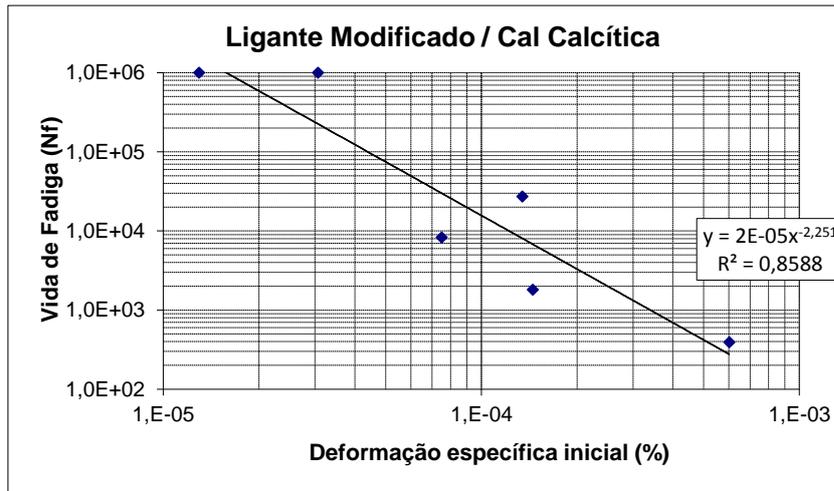


Figura 28: Curva de vida de fadiga *versus* deformação específica inicial para misturas com cal calcítica e ligante modificado.

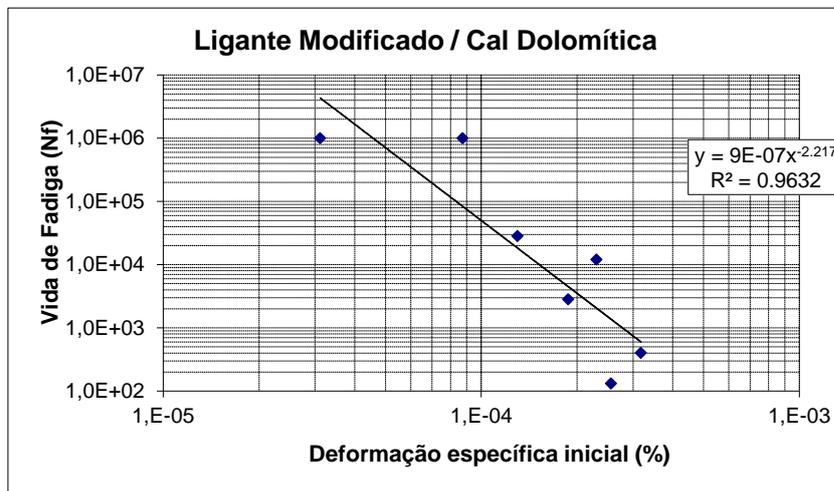


Figura 29: Curva de vida de fadiga *versus* deformação específica inicial para misturas com cal dolomítica e ligante modificado.

Em uma interpretação inicial das diferentes curvas de fadiga, leva-se em consideração a declividade das retas e a posição relativa das mesmas. Em suma, quanto menor a declividade e mais acima no gráfico está a linha de tendência, melhor o desempenho da mistura relativo à vida de fadiga. Porém, este tipo de interpretação direta dos modelos ou das curvas de fadiga geradas a partir dos resultados laboratoriais pode resultar em conclusões equivocadas, uma vez que as misturas possuem módulos de resiliência diferentes e logo, distribuem tensões de maneira diferente. Logo, não é possível comparar a vida de fadiga de cada mistura para um mesmo valor de solicitação (deformação, diferença de tensões ou tensão de tração).

Cada conjunto de dados gera uma equação da reta de tendência. Esta equação representa o modelo de vida de fadiga para cada uma das misturas. Para interpretar e

comparar as vidas de fadiga das diferentes misturas, cada um destas modelos foi utilizado, juntamente com o módulo de resiliência de uma das misturas, numa simulação mecânica que será apresentada adiante.

Embora na literatura universal se dê preferência à modelagem de vida de fadiga em função da deformação inicial, os resultados dos ensaios também foram modelados em função da diferença de tensões (Figuras 30 a 35) e de tensões no centro do corpo-de-prova (Figuras 36 a 41). A diferença de tensões foi calculada como sendo quatro vezes a tensão de tração. Em geral, os modelos apresentaram elevados valores de determinação (R^2) evidenciando sua significância estatística.

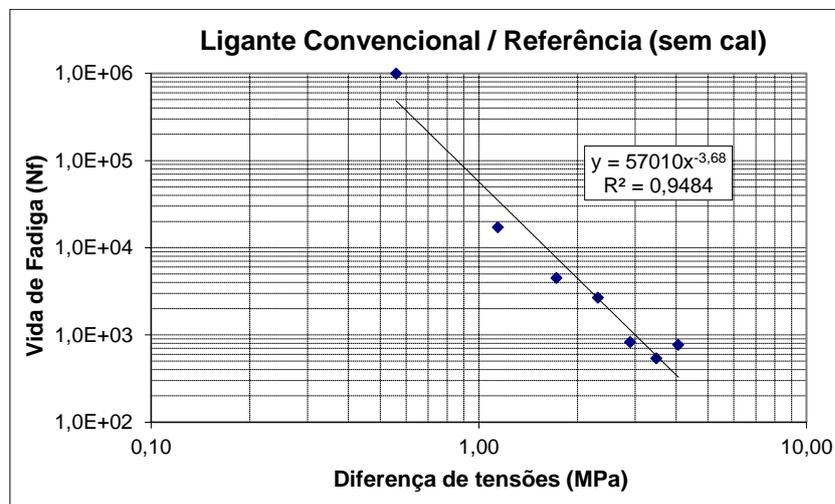


Figura 30: Curva de vida de fadiga *versus* diferença de tensões para misturas de referência (sem cal) com ligante convencional.

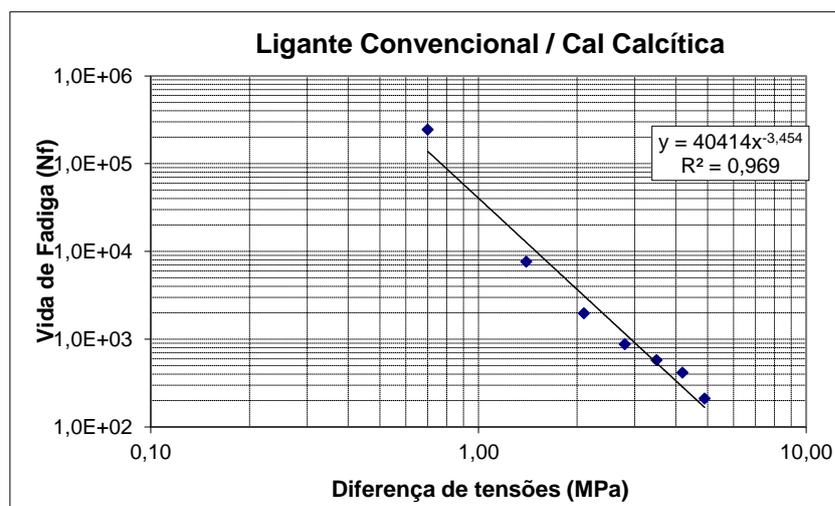


Figura 31: Curva de vida de fadiga *versus* diferença de tensões para misturas com cal calcítica e ligante convencional.

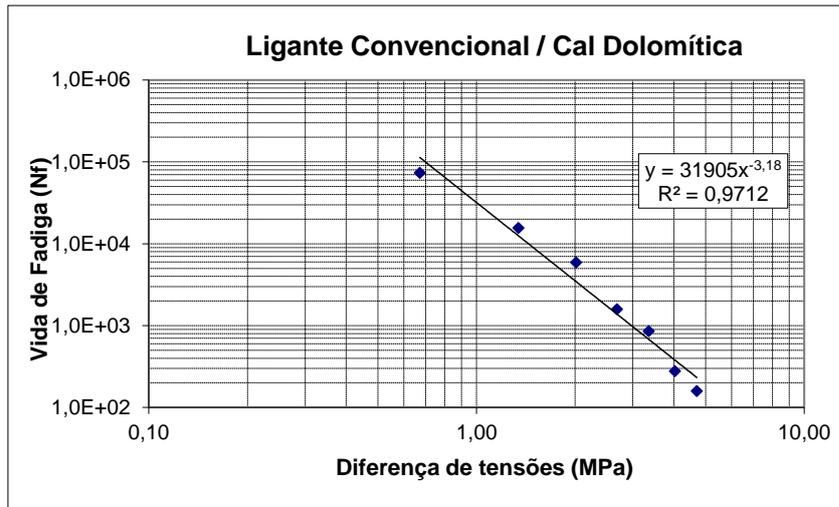


Figura 32: Curva de vida de fadiga *versus* diferença de tensões para misturas com cal dolomítica e ligante convencional

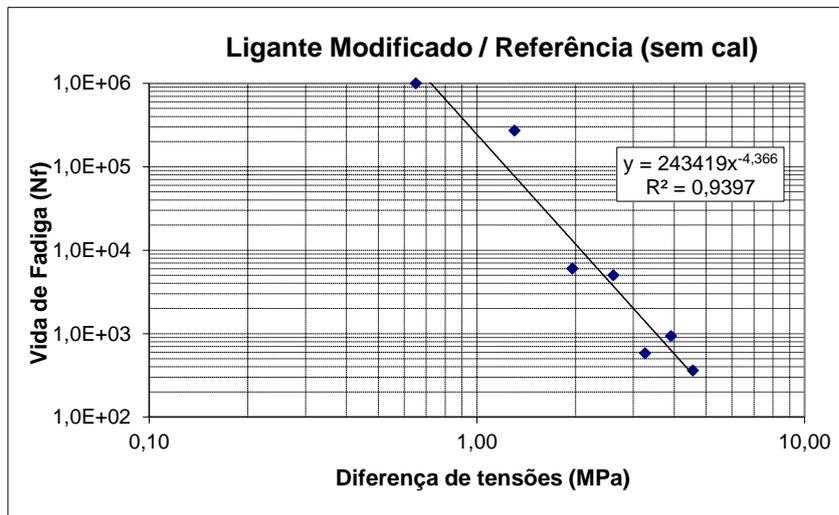


Figura 33: Curva de vida de fadiga *versus* diferença de tensões para misturas de referência (sem cal) com ligante modificado.

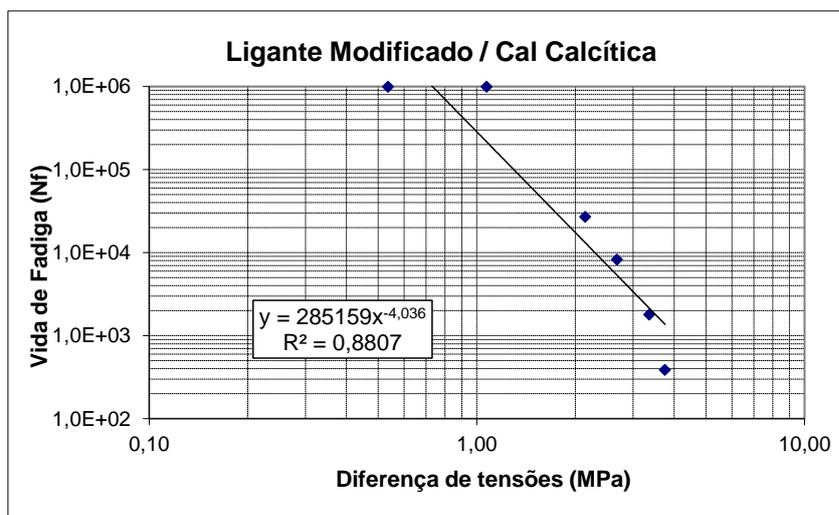


Figura 34: Curva de vida de fadiga *versus* diferença de tensões para misturas com cal calcítica e ligante modificado.

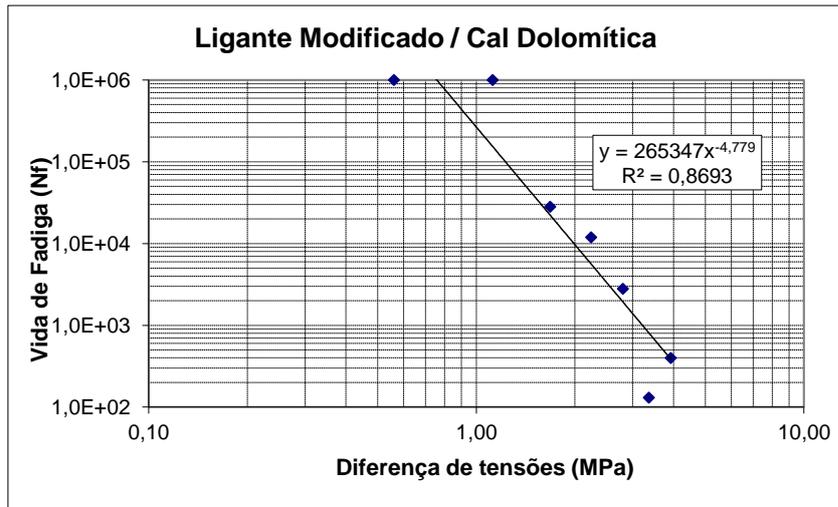


Figura 35: Curva de vida de fadiga *versus* diferença de tensões para misturas com cal dolomítica e ligante modificado.

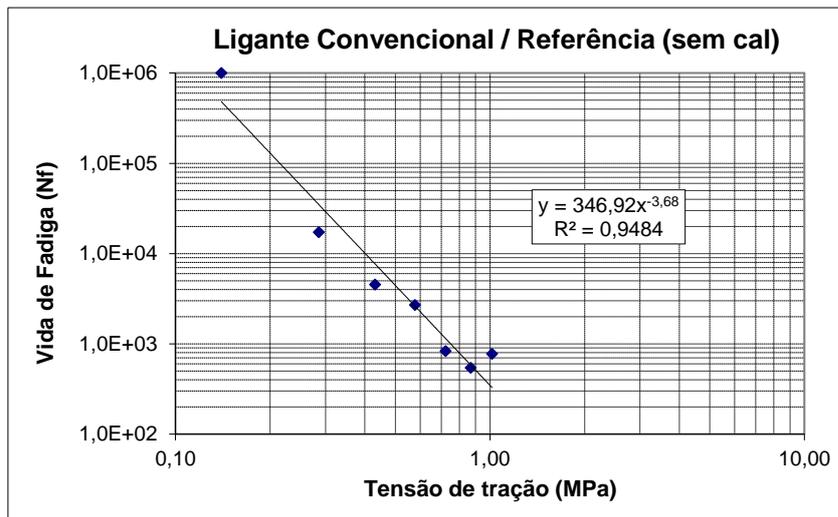


Figura 36: Curva de vida de fadiga *versus* tensão de tração para misturas de referência (sem cal) com ligante convencional.

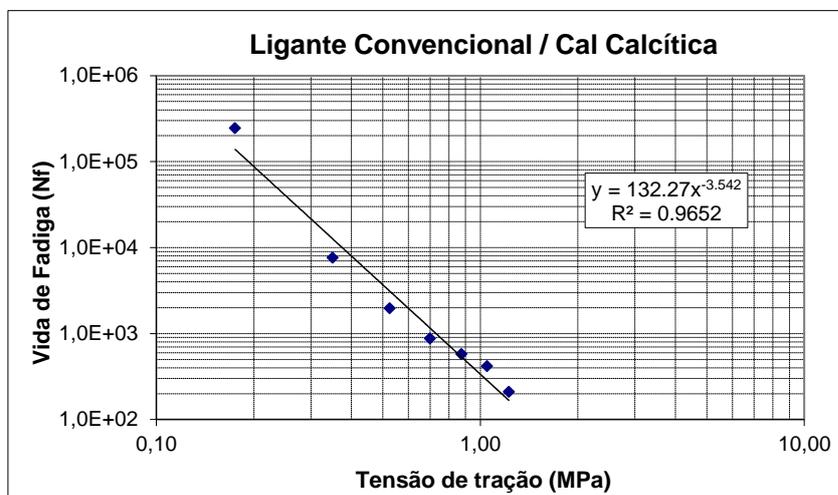


Figura 37: Curva de vida de fadiga *versus* tensão de tração para misturas com cal calcítica e ligante convencional.

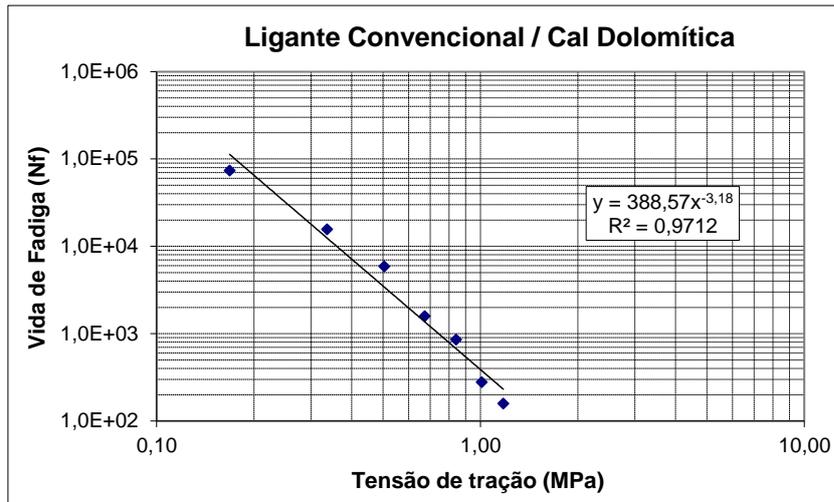


Figura 38: Curva de vida de fadiga *versus* tensão de tração para misturas com cal dolomítica e ligante convencional

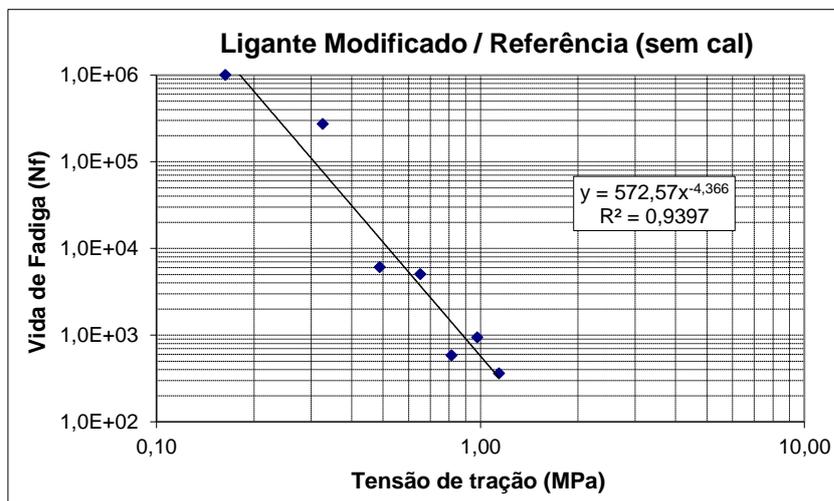


Figura 39: Curva de vida de fadiga *versus* tensão de tração para de referência (sem cal) com ligante modificado.

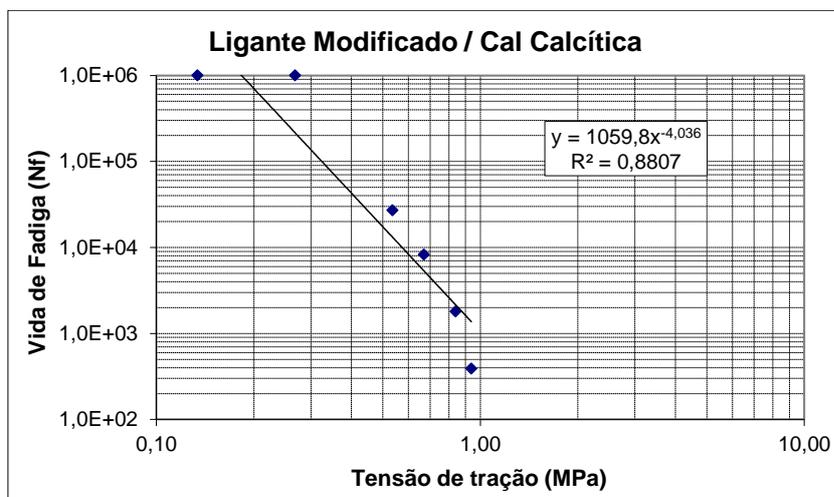


Figura 40: Curva de vida de fadiga *versus* tensão de tração para misturas com cal calcítica e ligante modificado.

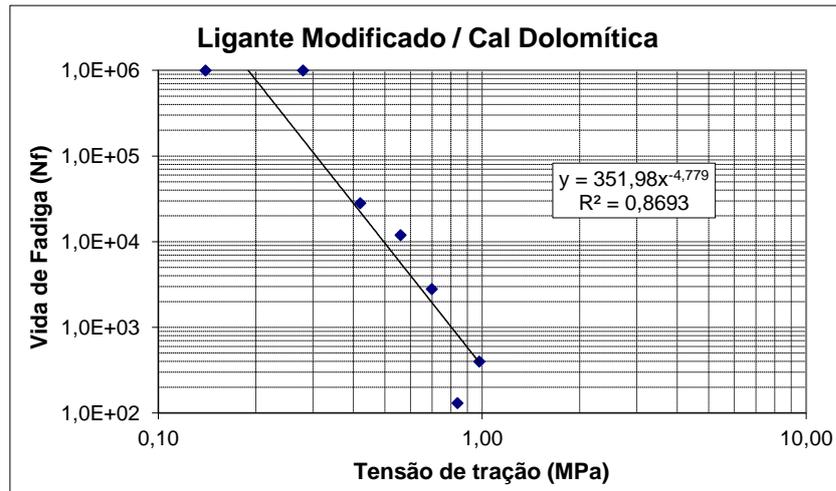


Figura 41: Curva de vida de fadiga *versus* tensão de tração para misturas com cal dolomítica e ligante modificado.

Nas figuras 42 a 44, apresentam-se as curvas de fadiga das seis misturas ensaiadas, em função de deformação específica inicial, da diferença de tensões no centro do corpo-de-prova e da tensão de tração.

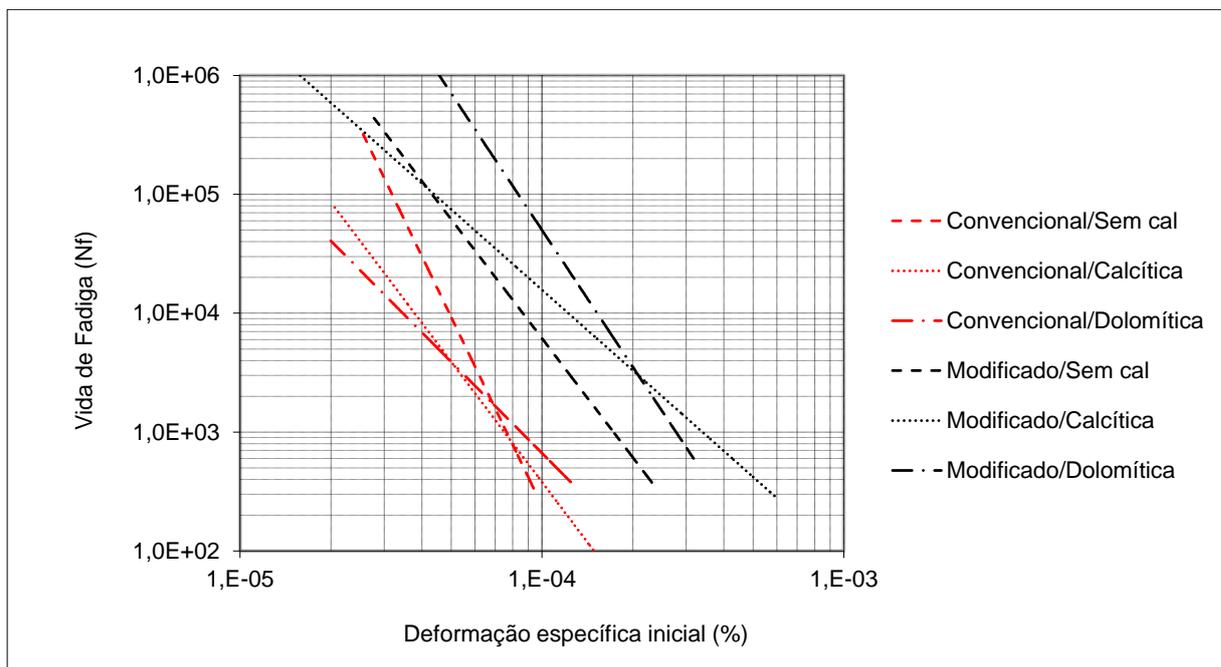


Figura 42: Comparativo entre as diferentes curvas para vida de fadiga *versus* deformação específica inicial.

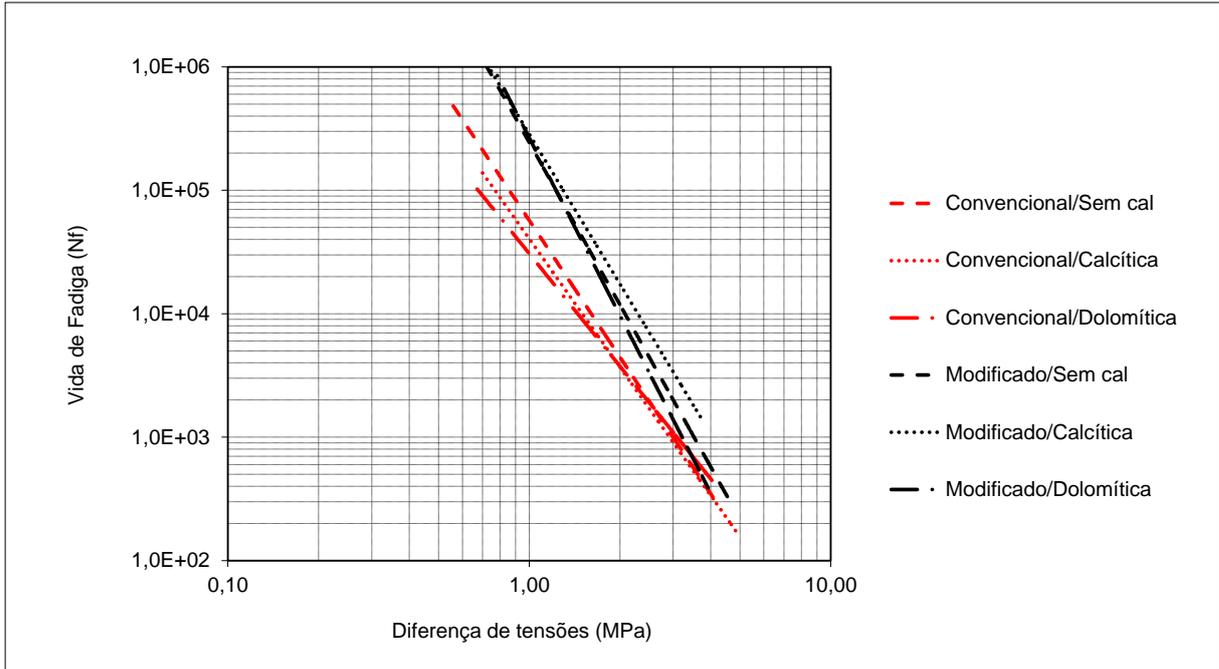


Figura 43: Comparativo entre as diferentes curvas para vida de fadiga *versus* diferença de tensões

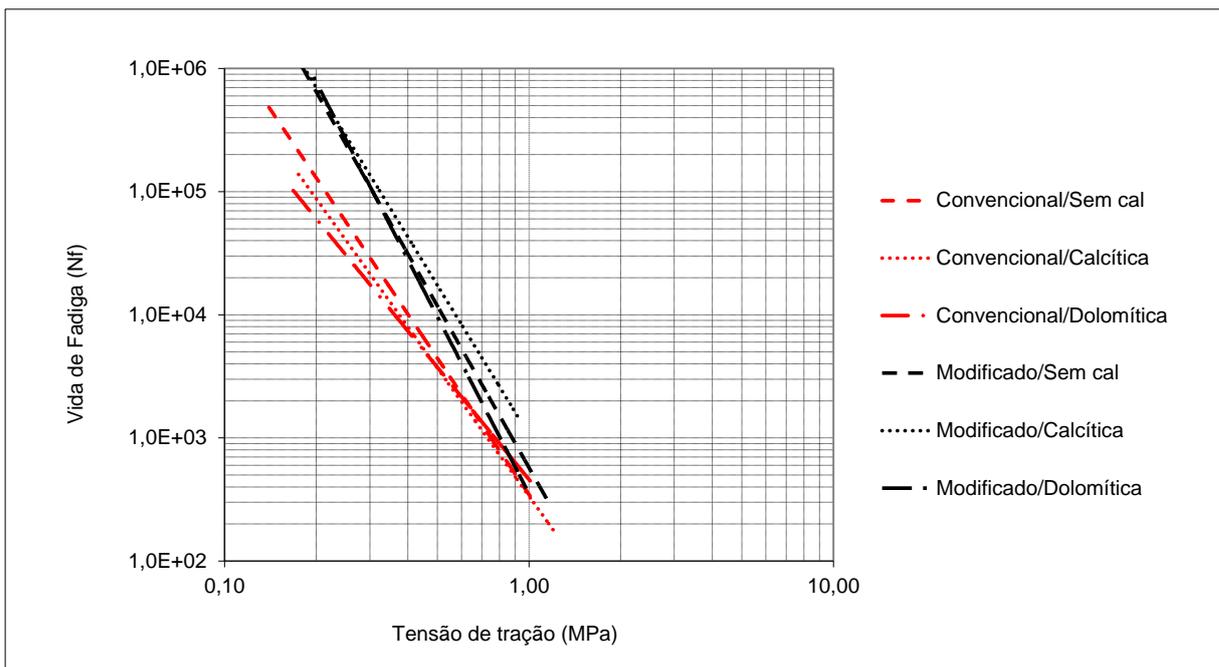


Figura 44: Comparativo entre as diferentes curvas para vida de fadiga *versus* tensão de tração

Os resultados do ensaio de fadiga por compressão diametral obtidos nesta dissertação, foram comparados com resultados de ensaios realizados no LAPAV também no modo de tensão controlada, e em condições idênticas de temperatura, frequência e inclusive utilizando o mesmo equipamento. Estes dados apresentados nas figuras 45 a 47 onde também

contemplamos resultados de Specht (2004) e Rohde (2007) e em Brito (2006) em sua dissertação.

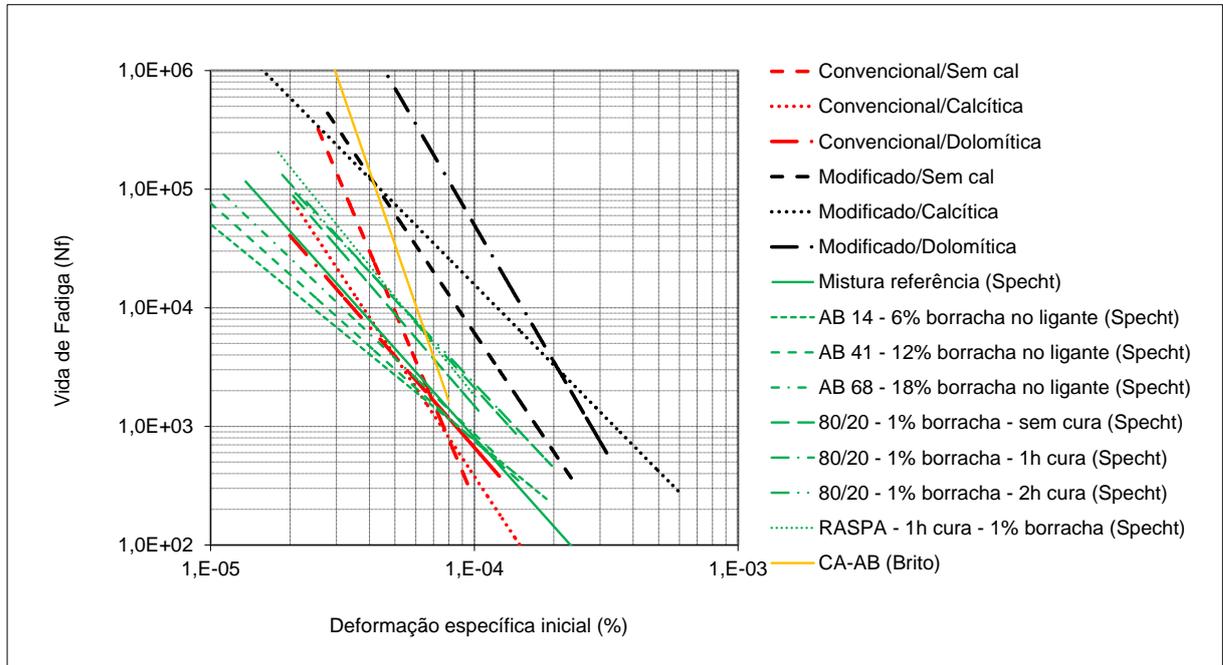


Figura 45: Comparativo entre misturas ensaiados no LAPAV– vida de fadiga em função da deformação específica inicial

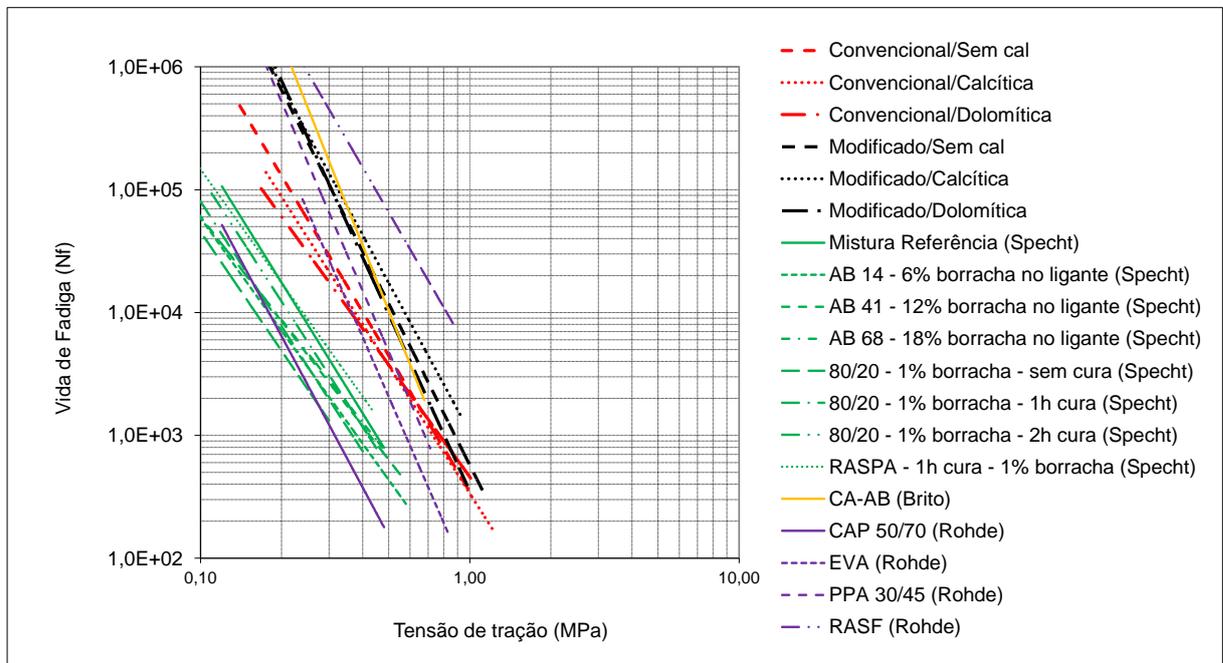


Figura 46: Comparativo entre misturas ensaiados no LAPAV– vida de fadiga em função da tensão de tração (MPa)

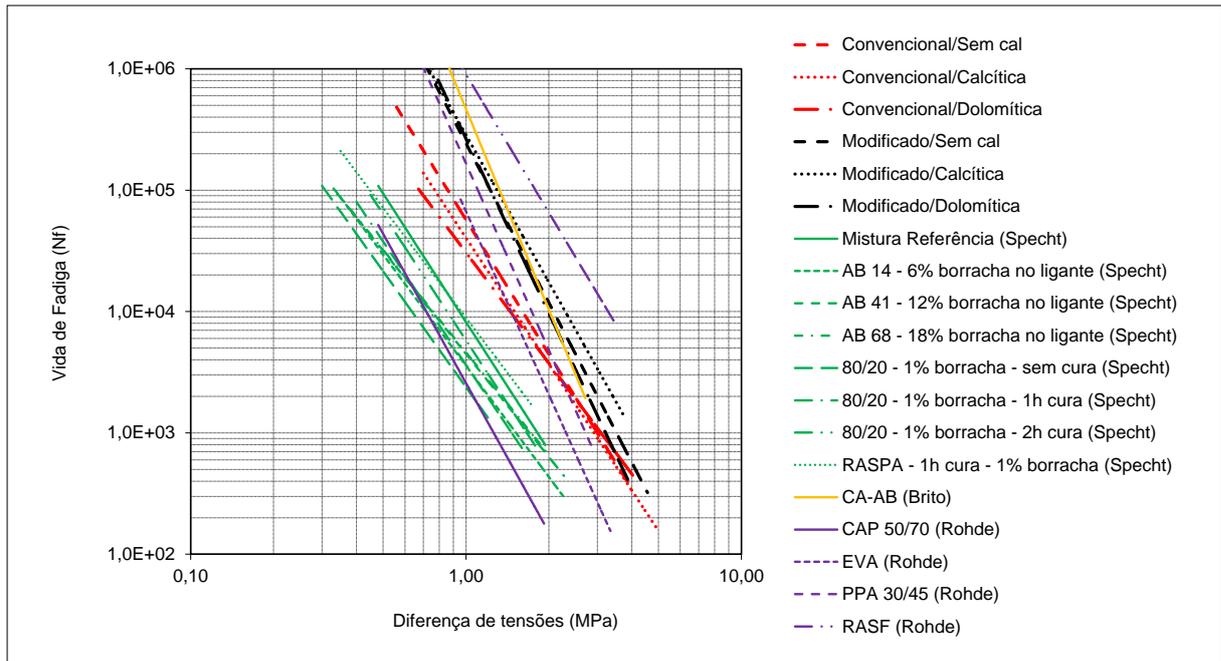


Figura 47: Comparativo entre misturas ensaiadas no LAPAV – vida de fadiga em função da diferença de tensões (MPa)

Cabe citar que as misturas de módulo elevado ensaiadas por Rohde (2007), eram compostas por três ligantes modificados com baixa penetração e um ligante de referência. Specht (2004) lançou ensaiou misturas asfálticas com incorporação de borracha de pneus. Já Brito (2006) utilizou o Ecoflex B, um ligante comercial obtido através da incorporação de pó de borracha de asfalto.

4.2 ANÁLISE MECANÍSTICA DOS RESULTADOS DOS ENSAIOS DE FADIGA POR COMPRESSÃO DIAMETRAL

A comparação direta de curvas de fadiga pode levar a interpretação errônea, uma vez que um dado carregamento (como por exemplo: um eixo padrão) provocara diferentes deformações em misturas com módulos de resiliência diferentes.

Para quantificar os efeitos de adição de cal na vida de fadiga dos concretos asfálticos estudados, fez-se uma análise mecânica. Consideraram-se revestimentos asfálticos constituídos pelas seis misturas ensaiadas nas espessuras de: 5; 10; 15 e 20, caracterizadas por seus modos de resiliência (Bock, 2012).

Calcularam-se as deformações de extensão na fibra inferior dos revestimentos e estimaram-se valores de N_f com os respectivos modelos de fadiga.

Para se ter uma estimativa de vida de fadiga das estruturas analisadas no campo, multiplicaram-se os valores de N_f obtidos pelo fator laboratório-campo (*shift factor*) proposto por Pinto e Preussler (2002), que é igual a 10^5 . Esse fator é indicado para ensaios em tensão controlada em corpos-de-prova cilíndricos.

Como já citado, os pontos de leitura das tensões/deformações/deslocamentos no software EVERSTRESS[®] foram abaixo do rodado e entre os rodados na fibra inferior da camada de asfáltica de revestimento. O software realiza o cálculo e leitura das deformações em ambos os sentidos dos eixos x-x e y-y. A convenção utilizada para apresentação dos dados foi à mesma da saída dos dados do software, sendo os valores positivos (+) os de tração, e os valores negativos (-) os de compressão.

Nas tabelas 19 e 20 apresentam-se as deformações específicas horizontais calculadas abaixo de uma roda, e entre as duas rodas, respectivamente.

Tabela 19: Deformações abaixo de uma roda nos eixos x-x e y-y, em microstrain.

Ligante	Convencional 50/70											
	Sem cal				Calcítica				Dolomítica			
Cal	5	10	15	20	5	10	15	20	5	10	15	20
Espessura (cm)	5	10	15	20	5	10	15	20	5	10	15	20
$\epsilon_{xx} (10^{-6})$	201	124	85	61	181	108	74	53	201	124	84	61
$\epsilon_{yy} (10^{-6})$	255	186	129	92	236	163	111	79	254	185	128	92
Ligante	Modificado 60/85											
	Sem cal				Calcítica				Dolomítica			
Cal	5	10	15	20	5	10	15	20	5	10	15	20
Espessura (cm)	5	10	15	20	5	10	15	20	5	10	15	20
$\epsilon_{xx} (10^{-6})$	214	136	93	67	206	129	88	64	222	144	99	71
$\epsilon_{yy} (10^{-6})$	265	201	141	102	259	192	134	96	272	212	151	109

(+) Tração (-) Compressão

Tabela 20: Deformações entre as rodas nos eixos x-x e y-y, em microstrain.

Ligante	Convencional 50/70											
	Sem cal				Calcítica				Dolomítica			
Cal	5	10	15	20	5	10	15	20	5	10	15	20
Espessura (cm)	5	10	15	20	5	10	15	20	5	10	15	20
$\epsilon_{xx} (10^{-6})$	-188	-16	29	39	-152	-2	31	36	-187	-15	29	39
$\epsilon_{yy} (10^{-6})$	197	175	129	95	189	155	111	81	197	174	128	95
Ligante	Modificado 60/85											
	Sem cal				Calcítica				Dolomítica			
Cal	5	10	15	20	5	10	15	20	5	10	15	20
Espessura (cm)	5	10	15	20	5	10	15	20	5	10	15	20
$\epsilon_{xx} (10^{-6})$	-213	-26	27	41	-198	-20	29	40	-231	-35	25	42
$\epsilon_{yy} (10^{-6})$	201	187	140	105	199	179	133	99	203	195	149	113

(+) Tração (-) Compressão

Observa-se que entre as rodas houve a ocorrência de tensões de compressão. Porém, nas análises de fadiga o que interessa são as tensões de tração e as deformação de extensão.

Os valores de vida de fadiga encontrados com os modelos gerados nos ensaios de fadiga são apresentados nas tabelas 13 e 14. Os valores críticos estão grifados.

Tabela 21: Valores críticos de vida de fadiga abaixo de uma roda.

Ligante	Convencional 50/70											
Cal	Sem cal				Calcítica				Dolomítica			
Espessura (cm)	5	10	15	20	5	10	15	20	5	10	15	20
N fadiga	2	8	56	325	9	37	164	617	84	170	383	802
Ligante	Modificado 60/85											
Cal	Sem cal				Calcítica				Dolomítica			
Espessura (cm)	5	10	15	20	5	10	15	20	5	10	15	20
N fadiga	76	141	308	636	2371	4656	10472	22024	72	125	268	547

Tabela 22: Valores críticos de vida de fadiga entre as rodas.

Ligante	Convencional 50/70											
Cal	Sem cal				Calcítica				Dolomítica			
Espessura (cm)	5	10	15	20	5	10	15	20	5	10	15	20
N fadiga	6	12	57	274	21	45	162	543	148	195	385	747
Ligante	Modificado 60/85											
Cal	Sem cal				Calcítica				Dolomítica			
Espessura (cm)	5	10	15	20	5	10	15	20	5	10	15	20
N fadiga	142	166	314	594	4301	5417	10589	20511	139	151	275	511

Aplicou-se então o *shift-factor*, proposto por Pinto e Preussler (2002) aos valores de N_f calculados para abaixo e entre as rodas, estimando-se assim, as vidas de fadiga no campo, apresentadas na tabela 23. Porém, atenta-se que o *shift-factor* não é calibrado para as misturas estudadas, e os mesmos foram utilizados apenas para se ter uma comparação entre as diversas misturas, não deve servir como parâmetro qualitativo individualmente para as misturas estudadas.

Tabela 23: Vida de fadiga no campo para diferentes espessuras e diferentes misturas asfálticas.

Ligante	Convencional 50/70											
Cal	Conv 50/70 Sem Cal				Conv 50/70 Cal Calcítica				Conv 50/70 Cal Dolomítica			
Espessura (cm)	5	10	15	20	5	10	15	20	5	10	15	20
N fadiga	2E+05	8E+05	6E+06	3E+07	9E+05	4E+06	2E+07	5E+07	8E+06	2E+07	4E+07	7E+07
Ligante	Modificado 60/85											
Cal	Modif 60/85 Sem cal				Modif 60/85 Cal Calcítica				Modif 60/85 Cal Dolomítica			
Espessura (cm)	5	10	15	20	5	10	15	20	5	10	15	20
N fadiga	8E+06	1E+07	3E+07	6E+07	2E+08	5E+08	1E+09	2E+09	7E+06	1E+07	3E+07	5E+07

Salienta-se que a expressão “vida de fadiga no campo” expressa um numero equivalente de operações do eixo padrão de 82 kN, que o pavimento poderá receber sem sofrer trincamento grave por fadiga.

Na figura 48 os resultados da análise mecânica serão apresentados graficamente.

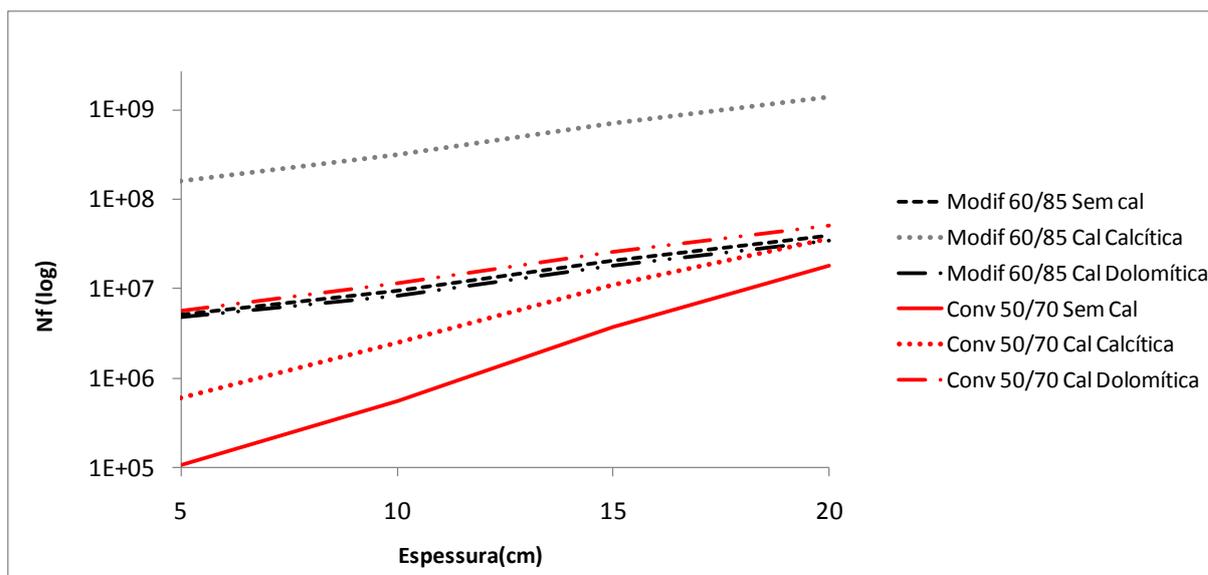


Figura 48: N_f para diferentes espessuras e diferentes misturas asfálticas

Como esperado, os concretos asfálticos com ligante modificado apresentaram vida de fadiga maiores, sendo o efeito do ligante ainda maior quando se acrescentou cal calcítica. Os resultados sugerem que há interação química entre o tipo de ligante e o tipo de cal.

Aliados aos benefícios na resistência a deformação permanente, e ao dano por umidade induzida já conhecidos para as misturas estudadas, os resultados apresentados nesta dissertação permitem concluir que a incorporação de cal permite obter-se concretos asfálticos de elevados desempenho e durabilidade.

Foi realizada uma comparação entre as vidas de fadigas apresentadas na tabela 23 e valores calculados da mesma forma para misturas ensaiadas por Specht (2004).

Na análise mecânica dos pavimentos com misturas ensaiadas por Specht consideraram-se os módulos de resiliência apresentados na tabela 24.

Tabela 24: Módulos de resiliência (MPa) para as misturas asfálticas de Specht (2004)

Mistura/cal	Módulos de resiliência (MPa)
Cap 20	6510
AB 14	5220
AB 41	4480
AB 68	4810
80/20 Sem cura	3120
80/20 1h cura	4420
80/20 2h cura	4660
Raspa	4810

Os resultados da comparação são apresentados na figura 49.

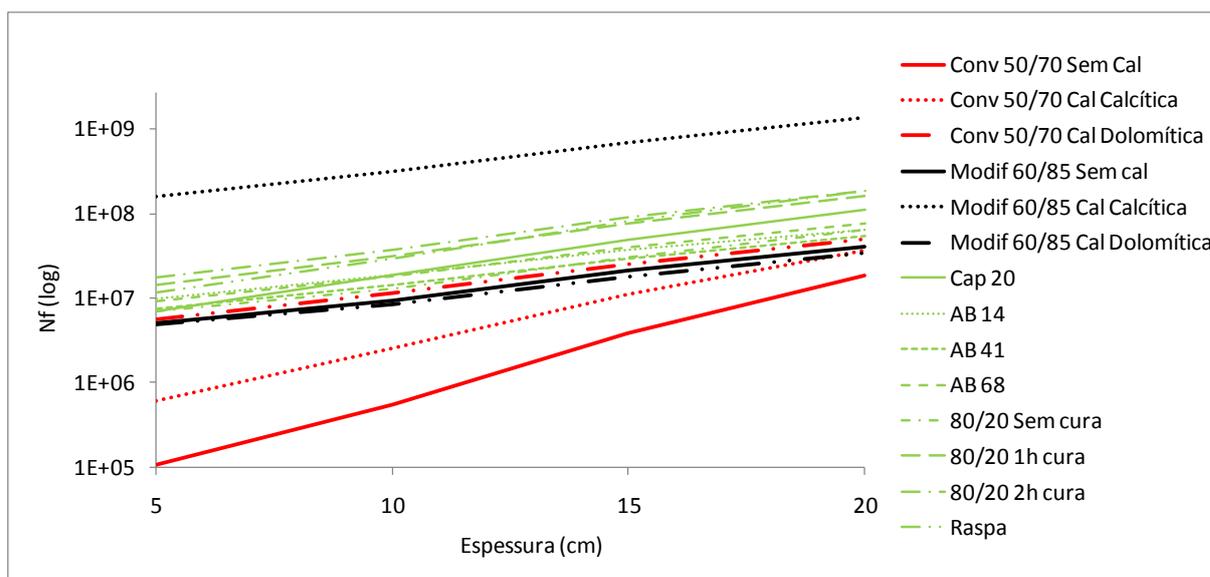


Figura 49: Comparação de vidas de fadigas de misturas deste estudo e misturas ensaiadas por Specht (2004).

Observa-se que a mistura com ligante modificado e cal calcítica, ensaiada neste estudo supera ligeiramente todas as misturas em asfalto-borracha.

Finalizando as análises mecânica, destaca-se que a adoção de um único *shift-factor* para revestimentos com espessuras diferentes é questionável, uma vez que, segundo Pinto e Preussler, o modo de ensaio à tensão controlada é indicado para revestimentos com espessuras superiores a 10 cm. Os autores afirmam que revestimentos com espessuras de até 6 cm deveriam ter a vida de fadiga analisada à deformação controlada. Isso pode explicar os valores excessivamente elevados de vida de fadiga no campo para revestimentos com apenas 5 cm, apresentados na tabela 23 e na figura 48.

Mais uma vez, se observa que ao adotar-se o *shift-factor* proposto por Pinto e Preussler (2002) procura-se apenas traduzir os resultados de laboratório para as condições de campo.

4.3 MODELAGEM ESTATÍSTICA DOS RESULTADOS DOS ENSAIOS DE FADIGA POR COMPRESSÃO DIAMETRAL

Neste item é apresentado um modelo estatístico que relaciona a vida de fadiga de laboratório com a deformação específica inicial e o módulo de resiliência da mistura.

O modelo de regressão múltipla foi obtido empregando o software *Statistica*.

$$\text{Log } N_f = 18,43 + 3,07 \log (1/e) - 7,54 \log (MR)$$

Onde:

N_f = Número de ciclos da vida de fadiga de laboratório,

e = Deformação específica inicial (em cm/cm),

MR = Módulo de resiliência (em MPa)

Este modelo vale para deformações compreendidas entre $1,3 \times 10^{-5}$ e $6,0 \times 10^{-3}$, e para módulos compreendidos entre 3333 e 5768 MPa. Dados estes que foram os valores dos respectivos parâmetros obtidos para as misturas estudadas.

O objetivo da modelagem foi evidenciar a significância não apenas da deformação específica inicial, mas também do modo de resiliência na vida de fadiga das misturas.

A regressão múltipla é uma técnica multivariada cuja finalidade principal é obter uma relação entre uma das variáveis estudadas (variável dependente ou resposta) e o restante das variáveis que descrevem o sistema (variáveis independentes ou explicativas), e reduzir um grande número de variáveis para poucas dimensões com o mínimo de perda de informação, permitindo a detecção dos principais padrões de similaridade, associação e correlação entre as variáveis.

Sua principal aplicação, após encontrar a relação matemática, é permitir a estimativa de valores para a variável dependente quando se têm as variáveis independentes (cálculo dos valores previstos). Ou seja, ela pode ser usada na previsão de resultados, por meio da regra estatística dos mínimos quadrados.

Em uma análise residual, se lançou mão da realização de um teste de hipótese, e conseqüentemente, da eliminação de alguns termos (03 termos), chamados valores espúrios, para que a significância do modelo aumentou-se. A eliminação destes termos gera conseqüentemente um aumento do valor de R^2 . Pode-se notar, neste caso, o valor de R^2 é razoável, de 0,89 e o valor de R^2 ajustado, de 0,80, evidenciando a significância do modelo.

```

Multiple Regression Results

Dependent: log Nf           Multiple R = ,89821179   F = 68,89684
                          R²= ,80678441   df = 2,33
No. of cases: 36           adjusted R²= ,79507438   p = ,000000
                          Standard error of estimate: ,541473400
Intercept: 18,434585278   Std.Error: 4,264448   t( 33) = 4,3229   p = ,0001

log (1/e) beta=,942       log MR beta=-,49

```

Figura 50: Resultados da regressão múltipla.

Para melhor visualização dos resultados são apresentados na figura 51, os valores previstos pelo modelo *versus* valores medidos, e também o gráfico de superfície linear.

No gráfico dos valores previstos pelos valores medidos, o fato de a hipérbole, representada pelas linhas pontilhadas aproximar-se da reta atesta a significância do modelo, visto que ela representa o campo onde o modelo tem 95% de confiança. Quanto mais próxima as hipérbolas se encontram da reta, mais significativo o modelo.

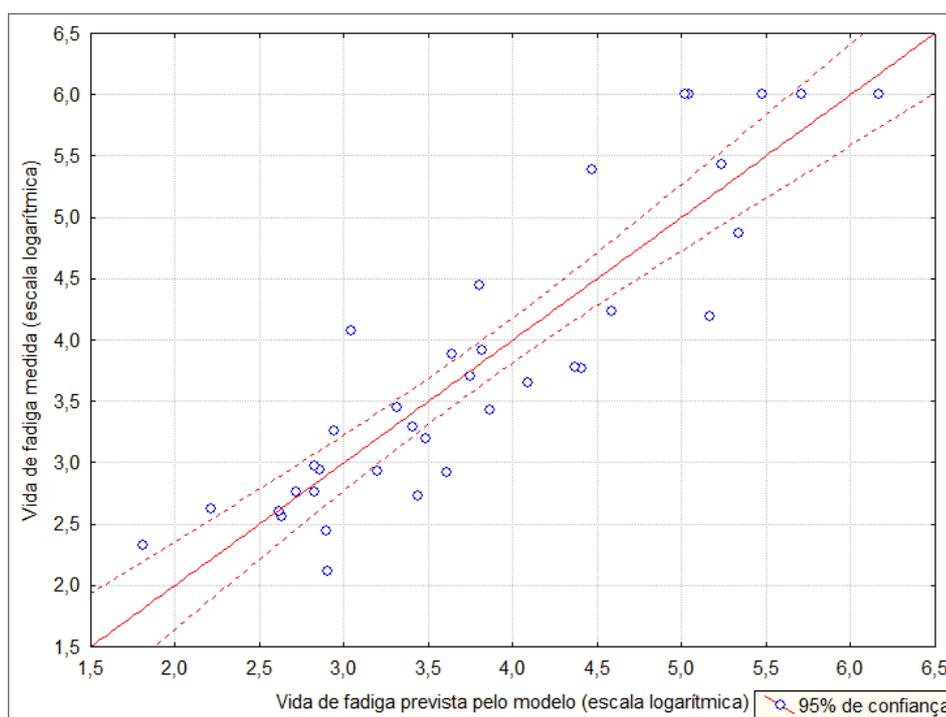


Figura 51: Gráfico de valores previstos pelo modelo e valores medidos.

Um gráfico de superfície linear demonstra a influência em que cada termo tem no outro, como por exemplo, pode-se perceber no gráfico apresentado na figura 52, que a diminuição do módulo de resiliência representa um aumento da vida de fadiga, sendo

diretamente proporcionais, como é de se esperar. E pode-se perceber ainda que a vida de fadiga aumenta com o inverso da deformação específica, ou seja, são inversamente proporcionais.

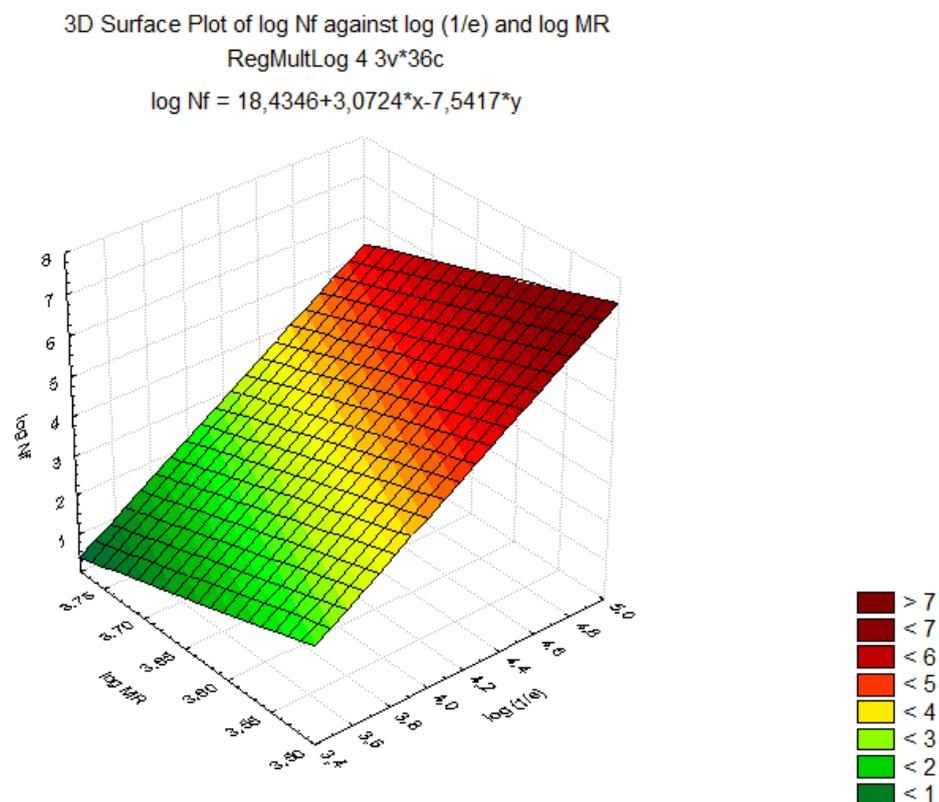


Figura 52: Gráfico tridimensional do modelo estatístico obtido.

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

Neste capítulo serão apresentadas as conclusões da pesquisa que teve como objetivo geral investigar, principalmente a vida de fadiga de misturas asfálticas com agregados de basalto e adição de cales calcítica e dolomítica, utilizando ligantes convencional e modificado.

5.1 CONCLUSÕES

Como já citado, a análise das curvas de fadiga, geradas no ensaio de fadiga por compressão diametral, deve ser feita com parcimônia, pois há sempre de se considerar o desempenho a fadiga com o comportamento traduzido pelo módulo de resiliência da mistura.

Porém, o que se pode afirmar a partir das curvas de Wöhler foi que o desempenho de todas misturas que continham ligante modificado, foi superior no que diz respeito a deformação específica inicial do corpo-de-prova. E destas, a mistura com melhor desempenho a que levou cal dolomítica.

Como já dito, o desempenho a fadiga de uma mistura não pode apenas considerar o resultado do ensaio de fadiga, mas também deve se levar em conta pelo menos um parâmetro de rigidez da mistura, como o realizado na análise mecanística deste estudo.

Nesta análise mecanística, realizada com o software *EVERSTRESS*[®], todas as misturas presenciaram tensões de compressão entre os rodados quando as espessuras modeladas foram de 5cm e 10cm.

De acordo com a modelagem realizada com as seis (06) misturas, pode-se concluir que praticamente todos os pavimentos viriam a romper por fadiga por tensões localizadas abaixo do rodado, isto se os pavimentos tivessem até 15 cm de espessura. Porém, quando o revestimento tinha 20 cm de espessura a ruptura viria a acontecer no ponto localizado entre os rodados.

Nas misturas que utilizaram ligante convencional, a vida de fadiga foi crescente na seguinte ordem: mistura que não utilizou cal, mistura com cal calcítica e mistura com cal dolomítica. Já dentre as misturas que utilizaram ligante modificado, a mistura que teve a maior vida útil de fadiga foi a com cal calcítica, seguida da mistura com cal dolomítica e da mistura sem cal.

A mistura com cal calcítica e ligante modificado, distou à vida útil de fadiga das demais misturas de até três casas de ordem de grandeza, alcançando até $2+E09$ para quando com 20 cm de espessura de concreto asfáltica.

Dentre o desempenho das misturas com cal dolomítica, a que se sobressaiu foi a que lançou mão do ligante convencional. Já as misturas com cal calcítica e sem cal, o desempenho foi melhor nas misturas com ligante modificado.

Observou-se também que a mistura com ligante modificado e cal calcítica, ensaiada neste estudo supera ligeiramente todas as misturas em asfalto-borracha. Porém, sendo a única mistura estudada que chegou a tal feito, as demais obtiveram resultados inferiores a estas misturas estudadas por Specht (2004).

Pela análise estatística pode-se concluir que a diminuição do módulo de resiliência representa um aumento da vida de fadiga, sendo diretamente proporcionais. E já a vida de fadiga aumenta com o inverso da deformação específica, ou seja, são inversamente proporcionais. E o modelo de regressão múltipla apresentado, que obteve alta confiabilidade, tem boa representatividade dos dados deste estudo, podendo ser usado na previsão de resultados, por meio da regra estatística dos mínimos quadrados dentro de determinado intervalo de valores.

E como conclusão final pode-se afirmar que a maioria dos resultados apresentados por Little et al (2006) pode-se confirmar, se considerarmos em conjunto os resultados obtidos neste estudo com os resultados obtidos por Bock (2012), trabalho complementar a este.

5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Com o objetivo de complementar os resultados obtidos na presente dissertação e contribuir para futuros trabalhos que venham a pesquisar o tema, sugere-se:

- a) Monitorar o desempenho de pavimentos experimentais visando o aumento da confiabilidade de um fator laboratório-campo;
- b) Equipar o ensaio de fadiga por compressão diametral para se obter o laço histerético em ensaios com medição de dissipação de energia.
- c) Avaliar o desempenho das misturas estudadas através de ensaios acelerados, usando o simulador de tráfego em operação no LAPAV.

REFERÊNCIAS

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. **Resistance of Compacted Bituminous Mixture Induced Damage**. AASHTO T 283. United States, 1989.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Standard Test Method for Effect of Water on Compressive Strength of Compacted Bituminous Mixtures**: ASTM D 1075. United States, 1996.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Standard Practice for Preparation of Bituminous Using Marshall Apparatus**. D 6926-04. In: ASTM ...Annual Book of ASTM Standards, Philadelphia, 2004.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Standard Test Method for Marshall Stability and Flow of Bituminous Mixtures**. D 6927-05. In: ASTM Annual Book of ASTM Standards, Philadelphia, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9935. **Agregados – Terminologia**. Rio de Janeiro, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15.617. **Misturas asfálticas – Determinação do dano por umidade induzida**. Rio de Janeiro, 1998.

ASSOCIATION MONDIALE DE LA ROUTE. **Emploi de lianas bitumineux modifies**. Des bitumes spéciaux et des bitumes avec additives en techniques routères. Guide Technique. La Defense: AIPCR, Sept. 1999.

ASPHALT INSTITUTE. **Mix Design Methods for Asphalt Concrete and Other Hot-mix Types**. Lexington, Manual Series No2 (MS-2), 6 ed. 1995.

BABURAMANI, P. – **Asphalt fatigue life prediction models – a literature review**, Research Report ARR 334, 1997.

BALBO, J. T. **Fatos, mitos e falácias sobre os modelos experimentais de fadiga**. In: Anais da 32ª Reunião Anual de Pavimentação, Brasília. 2000.

BENEVIDES, S. A. S. **Análise comparativa dos métodos de dimensionamento de pavimentos asfálticos**: empírico do DNER e da resiliência da COPPE/UFRJ em rodovias do estado do Ceará. 2000. Tese de doutorado, COPPE/UFRJ – Universidade Federal do Rio de Janeiro.

BERNUCCI, L. B. et al. **Pavimentação Asfáltica**: Formação Básica para Engenheiros. Rio de Janeiro, PETROBRAS, ABEDA, 2006.

BOCK, A. L. **Efeitos da incorporação de cal hidratada em concretos asfálticos elaborados com ligante convencional e modificado**. 2012. Dissertação de mestrado, UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

BOCK, A. L.; HARTMANN, D. A.; BUDNY, J.; CERATTI, J. A. P.; SPECHT, L. P. **Estudo Laboratorial Sobre os Efeitos de Diferentes Formas de Adição de Cal a Concreto Asfáltico**. Teoria e Prática na Engenharia Civil, v.09, p.60- 69, 2009.

BRAZ, D. **Tomografia computadorizada no estudo da mecânica da fratura em misturas asfálticas**. 1997. Tese de doutorado, COPPE/UFRJ – Universidade Federal do Rio de Janeiro.

BRITO, L. A. T. **Avaliação e análise paramétrica do ensaio de compressão diametral sob cargas repetidas em misturas asfálticas**. 2006. Dissertação de mestrado, UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

BROSSEAUD, Y. **Revestimentos asfálticos franceses: panorama das técnicas, balanço de comportamento**. In: 16º Encontro do Asfalto. IBP, Rio de Janeiro. 2002.

BROSSEAUD, Y.; BOGDANSKI, B.; CARRÉ, D. **Transfert de technologie réussi entre la France et La Pologne: première réalisation d'un chantier de renforcement utilisant un enrobé à haut module et un béton bitumineux très mince**. França, 2003.

CARPENTER S. H.; GHUZLAN K. A.; SHEN S. **A fatigue endurance limit for high-way and airport pavements**. Estados Unidos da América, 2003.

CERATTI, J. A. P. **Estudo do comportamento a fadiga de solos estabilizados com cimento para utilização em pavimentos**. 1991. Tese de doutorado, COPPE/UFRJ – Universidade Federal do Rio de Janeiro.

COLPO, GRACIELI BORDIN. **Análise de fadiga de misturas asfálticas através do ensaios de flexão em vida quatro pontos**. 2014. Dissertação de mestrado, UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

CORTÉ, J. F.; SERFASS, J. P. **The French Approach to Asphalt Mixtures Design: a Performance-Related System of Specifications**. Communication au TRB, Washington. 2000.

CORTÉ, J. F. **Development and Uses of Hard Grade Asphalt and of High Modulus Asphalt Mixes in France**. Draft Version. 2003.

DELORME, J.L.; GOYON V.; e GAVALDA, A. **Asphaltic concrete with high modulus (EME): description, use, performance**. In: Proceedings of 1st Euro asphalt & Euro bitumie Congress. 1996.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGEM. **Agregado graúdo – adesividade a ligante betuminoso**. DNER – ME 078/94. Rio de Janeiro, 1994.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGEM. **Misturas Betuminosas a Quente** – Ensaio Marshall. DNER – ME 043/95. Rio de Janeiro, 1995, 11p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES–**Manual de Pavimentação**. DNIT. 3º ed. Rio de Janeiro, 2006.

DEPARTAMENTO AUTONOMO DE ESTRADAS E RODAGEM. **Concreto Asfáltico**. DAER/RS – ES 16/98. Porto Alegre, 1998.

FALCÃO, M. F. B.; SOARES, J. B. **Discussão sobre os modos de ruptura observados no ensaio de compressão diametral**, IBP – Instituto Brasileiro de Petróleo, 2002.

GHUZLAN, K. A.; CARPENTER S. H. **Energy-Derived, Damage-Based Failure Criterion for Fatigue Testing**, Transportation Research Board, United States, 2000.

HICKS, R.G.; SCHOLZ, T.V. **Life Cycle Cost for Lime in Hot Mix Asphalt**. Report and Software for National Lime Association, 2001.

HUANG, Y. H. **Pavement analysis and design**, Prentice Hall, New Jersey, 1993.

KIM, Y. R. **Fatigue performance evaluation of westrack asphalt mixtures using viscoelastic continuum damage approach** (Report No. FHWA/NC/2002-004), United States, 2002.

LITTLE, D.;EPPS, J. **The Benefits of Hydrated Lime in Hot Mix Asphalt**. Report for National Lime Association, 2001.

LITTLE, D. N.; EPPS, J. A.; SEBAALY, P. E. **The benefits of hydrated lime in hot mix asphalt**. Report for National Lime Association, 2006.

LUTIF J. E. S.; KIM, Y.; SOARES, J. B. - **Influência do método de adição de cal hidratada em misturas asfálticas para reduzir os danos devido à umidade em pavimentos flexíveis**, ANPET, 2008

LYTTON, R. L. et al. **Development and validation of performance prediction models and specifications for asphalt binders and paving mixes** – Strategic Highway Program, United States, 1993.

MAGALHÃES, S. T. **Misturas asfálticas de módulo elevado para pavimentos de alto desempenho**. Rio de Janeiro, 2004.

MEDINA, J.;MOTTA, L. M. G. **Mecânica dos Pavimentos**. Rio de Janeiro: Editora UFRJ. 2005.

MOTTA, L. M. G. **Método de dimensionamento de pavimentos flexíveis: critério de confiabilidade e ensaios de cargas repetidas.**1991. Tese de doutorado, COPPE/UFRJ – Universidade Federal do Rio de Janeiro.

MOURA, E. **Estudo do efeito de aditivos químicos e da cal como melhoradores de adesividade em misturas asfálticas densas.** 2001. Tese de Doutorado em Engenharia Civil - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

NÚÑEZ, W. P.; CERATTI, J. A. P.; PERAÇA, V.; TSUKUDA, R. S. **Produzindo misturas asfálticas de elevado desempenho com emprego de cal hidratada.** ABPv - 38a Reunião Anual de Pavimentação – Manaus, 2007.

PINTO, S. **Estudo do comportamento à fadiga de misturas betuminosas e aplicação na avaliação estrutural de pavimentos.**1991.Tese de doutorado, COPPE/UFRJ – Universidade Federal do Rio de Janeiro.

PINTO, S.; PREUSSLER, E. **Pavimentação rodoviária** – conceitos fundamentais sobre pavimentos flexíveis. Rio de Janeiro: Copiarte, 2002

REIS, R. M. M. **Investigação de campo e laboratório sobre revestimento ultra delgado.** Porto Alegre, 2012.

RODRIGUES, R. M. **Estudo do trincamento dos pavimentos.**1991.Tese de doutorado, COPPE/UFRJ – Universidade Federal do Rio de Janeiro.

ROHDE, L. **Estudo de misturas asfálticas de módulo elevado para camadas estruturais de pavimentos.** 2007. Tese de doutorado, UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

SHEN, S.; CARPENTER, S. H. **Dissipated energy concepts for ham performance: fatigue and healing**, Technical report of research supported by the Federal Aviation Administration, United States, 2007.

SOARES, J. B. **Considerações sobre módulo resiliente e módulo dinâmico em misturas asfálticas com base na teoria da viscoelasticidade,** 2009.

SPECHT, L. P. **Avaliação de misturas asfálticas com incorporação de borracha reciclada de pneus.** 2004. Porto Alegre. Tese de Doutorado em Engenharia Civil, UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

STRATEGIC HIGHWAY RESEARCH PROGRAM. **The Superpave Mix Design Manual for New Construction and Overlays - SHRP-A407.** Washington D.C., 1994.

TAYEBALI, A. A. et al. **Modeling fatigue response of asphalt-aggregate mixtures,** 1993.

TRICHÊS, G. **Concreto compactado a rolo para aplicação em pavimentação**: estudo do comportamento na fadiga e proposição de metodologia de dimensionamento. 1993. Tese de doutorado, ITA – Infraestrutura Aeronáutica.

VINHA, A. M. **Aditivo Melhorador de Adesividade** – Dop. Petrobrás Distribuidora S/A. BR Asfaltos. 1975

VINHA, A. M. **Cap-Dop Agente Melhorador de Adesividade**. Produtos Asfálticos Aplicáveis em Pavimentação Rodoviária. Petrobrás Distribuidora S/A. BR. 1975.

ANEXOS



Avenida Bento Gonçalves, 9500,
Prédio 43-816, Bairro Agronomia,
CEP 91501-970

	RT	Nº CP	h (cm)	d (cm)	% RT	TT (MPa)	Dif. T (MPa)	Carga (Kgf)	Pressão	d0 média	e (cm/cm)	Nº Ciclos
Convencional/Dolomítica	1,68	8	6,14	10,20	10%	0,17	0,67	1652,7178	0,94023	0,00020360	0,000019961	73245
		7	6,24	10,20	20%	0,34	1,34	3359,2702	1,93174	0,00023127	0,000022673	15573
		6	6,05	10,20	30%	0,50	2,02	4885,4770	2,81846	0,00040900	0,000040098	5879
		4	6,11	10,20	40%	0,67	2,69	6578,5707	3,80215	0,00081265	0,000079672	1582
		3	6,15	10,20	50%	0,84	3,36	8277,0479	4,78896	0,00101333	0,000099346	851
		2	6,13	10,20	60%	1,01	4,03	9900,1568	5,73199	0,00126967	0,000124477	277
		1	6,23	10,20	70%	1,18	4,70	11738,6035	6,80013	-	-	-
Convencional/Sem cal	1,46	2	6,32	10,20	10%	0,14	0,56	1416,8197	0,84317	0,00026080	0,000025569	1000000
		1	6,42	10,20	20%	0,29	1,14	2941,0686	1,72876	0,00036763	0,000036042	17185
		7	6,23	10,20	30%	0,43	1,73	4309,6230	2,52389	0,00053200	0,000052157	4528
		4	6,11	10,20	40%	0,58	2,31	5654,8232	3,30545	0,00063137	0,000061899	2687
		8	6,22	10,20	50%	0,72	2,90	7213,3249	4,21094	0,00076570	0,000075069	828
		9	6,23	10,20	60%	0,87	3,48	8681,5238	5,06397	0,00086633	0,000084935	541
		4	6,26	10,20	70%	1,02	4,06	10188,6462	5,93960	0,00097073	0,000095170	774
Convencional/Calcítica	1,75	10	6,44	10,20	10%	0,18	0,70	1805,6974	1,02911	0,00021000	0,000020588	243952
		11	6,43	10,20	20%	0,35	1,40	3605,7871	2,07496	0,00039063	0,000038297	7593
		12	6,42	10,20	30%	0,53	2,10	5400,2690	3,11756	0,00046483	0,000045572	1967
		13	6,30	10,20	40%	0,70	2,80	7065,7726	4,08521	0,00070330	0,000068951	873
		15	6,24	10,20	50%	0,88	3,50	8748,0994	5,06265	0,00071970	0,000070559	575
		17	6,42	10,20	60%	1,05	4,20	10800,5381	6,25511	0,00114067	0,000111830	416
		18	6,35	10,20	70%	1,23	4,90	12463,2377	7,22114	0,00154133	0,000151111	210
Modificado/Sem cal	1,63	10	6,43	10,2	10%	0,163	0,652	1679,266567	0,955653876	0,0002832	0,000027765	1000000
		11	6,44	10,2	20%	0,326	1,304	3363,756359	1,934342445	0,00033925	0,000033260	272521
		12	6,65	10,2	30%	0,489	1,956	5210,1661	3,007106504	0,0006496	0,000063686	6055
		13	6,34	10,2	40%	0,652	2,608	6623,048235	3,827991024	0,0010345	0,000101422	5039
		15	6,51	10,2	50%	0,815	3,26	8500,79732	4,918963243	0,002232	0,000218824	583
		16	6,43	10,2	60%	0,978	3,912	10200,95678	5,906755892	0,002057333	0,000201699	939
		18	6,6	10,2	70%	1,141	4,564	11754,86597	6,80957713	0,002387333	0,000234052	362
Modificado/Calcítica	1,34	5	6,33	10,2	10%	0,13	0,54	1359,031656	0,769597392	0,0003126	0,000030647	1000000
		2	6,45	10,2	20%	0,27	1,07	2769,590578	1,589132126	0,00013235	0,000012975	1000000
		6	6,22	10,2	40%	0,54	2,14	5341,659967	3,083504441	0,001375	0,000134804	27095
		7	6,39	10,2	50%	0,67	2,68	6859,567361	3,965408637	0,0007667	0,000075167	8254
		9	6,21	10,2	70%	0,94	3,75	9332,876156	5,402401046	0,006144667	0,000602418	390
		3	5,17	10,2	40%	0,84	3,36	6954,790262	4,020733142	0,001482	0,000145294	1800
		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Modificado/Dolomítica	1,4	12	6,27	10,2	10%	0,14	0,56	1406,43	0,797133044	0,00031775	0,000031152	1000000
		15	6,22	10,2	20%	0,28	1,12	2790,42	1,601233663	0,00089195	0,000087446	1000000
		10	6,4	10,2	30%	0,42	1,68	4306,76	2,482225589	0,0013265	0,000130049	28187
		18	6,38	10,2	40%	0,56	2,24	5724,40	3,305874846	0,0023515	0,000230539	11991
		17	6,31	10,2	50%	0,70	2,80	7076,99	4,09173007	0,001914	0,000187647	2814
		14	5,24	10,2	60%	0,84	3,36	7052,31	4,077394402	0,002612	0,000256078	131
		11	5	10,2	70%	0,98	3,92	7850,86	4,54134873	0,003240333	0,000317680	399

Anexo A - Dados dos ensaios de fadiga

Mistura	Cap 20				AB 14			
Espessura (cm)	5	10	15	20	5	10	15	20
ϵ_{xx} (10^{-6})	172	101	69	49	189	114	78	56
ϵ_{yy} (10^{-6})	226	153	103	73	243	171	117	84
Mistura	AB 41				AB 68			
Espessura (cm)	5	10	15	20	5	10	15	20
ϵ_{xx} (10^{-6})	201	124	84	61	195	119	81	59
ϵ_{yy} (10^{-6})	254	185	128	92	249	179	123	88
Mistura	80/20 Sem cura				80/20 1h cura			
Espessura (cm)	5	10	15	20	5	10	15	20
ϵ_{xx} (10^{-6})	226	149	102	74	202	125	85	62
ϵ_{yy} (10^{-6})	276	218	156	113	255	186	129	93
Mistura	80/20 2h cura				Raspa			
Espessura (cm)	5	10	15	20	5	10	15	20
ϵ_{xx} (10^{-6})	198	121	83	60	195	119	81	59
ϵ_{yy} (10^{-6})	251	181	125	90	249	179	123	88

(+) Tração (-) Compressão

Anexo B - Deformações abaixo de uma roda nos eixos x-x e y-y, em microstrain, para Specht (2004)

Mistura	Cap 20				AB 14			
Espessura (cm)	5	10	15	20	5	10	15	20
ϵ_{xx} (10^{-6})	-136	3	31	34	-165	-7	30	37
ϵ_{yy} (10^{-6})	185	147	104	75	192	163	118	86
Mistura	AB 41				AB 68			
Espessura (cm)	5	10	15	20	5	10	15	20
ϵ_{xx} (10^{-6})	-187	-15	29	39	-177	-11	30	38
ϵ_{yy} (10^{-6})	197	174	128	95	195	169	123	91
Mistura	80/20 Sem cura				80/20 1h cura			
Espessura (cm)	5	10	15	20	5	10	15	20
ϵ_{xx} (10^{-6})	-241	-40	24	42	-189	-16	29	39
ϵ_{yy} (10^{-6})	203	200	154	117	197	175	129	96
Mistura	80/20 2h cura				Raspa			
Espessura (cm)	5	10	15	20	5	10	15	20
ϵ_{xx} (10^{-6})	-181	-13	30	39	-177	-11	30	38
ϵ_{yy} (10^{-6})	196	171	125	93	195	169	123	91

(+) Tração (-) Compressão

Anexo C - Deformações entre as rodas nos eixos x-x e y-y, em microstrain, para Specht (2004)

Mistura	Cap 20				AB 14			
Espessura (cm)	5	10	15	20	5	10	15	20
N fadiga	105	278	742	1765	148	278	553	1028
Mistura	80/20 Sem cura				80/20 1h cura			
Espessura (cm)	5	10	15	20	5	10	15	20
N fadiga	103	189	450	1022	212	458	1125	2553
Mistura	AB 41				AB 68			
Espessura (cm)	5	10	15	20	5	10	15	20
N fadiga	112	212	441	861	134	272	598	1222
Mistura	80/20 2h cura				Raspa			
Espessura (cm)	5	10	15	20	5	10	15	20
N fadiga	262	564	1351	2983	171	427	1190	3007

Anexo D - Valor crítico de vida de fadiga abaixo de uma roda para Specht (2004)

Mistura	Cap 20				AB 14			
Espessura (cm)	5	10	15	20	5	10	15	20
N fadiga	174	308	732	1622	226	307	552	966
Mistura	80/20 Sem cura				80/20 1h cura			
Espessura (cm)	5	10	15	20	5	10	15	20
N fadiga	227	236	466	948	397	535	1134	2359
Mistura	AB 41				AB 68			
Espessura (cm)	5	10	15	20	5	10	15	20
N fadiga	187	240	444	807	226	307	600	1140
Mistura	80/20 2h cura				Raspa			
Espessura (cm)	5	10	15	20	5	10	15	20
N fadiga	471	650	1357	2763	336	501	1194	2749

Anexo E - Valor crítico de vida de fadiga entre as rodas para Specht (2004)

Mistura	Cap 20				AB 14			
Espessura (cm)	5	10	15	20	5	10	15	20
N fadiga	1E+07	3E+07	7E+07	2E+08	1E+07	3E+07	6E+07	1E+08
Mistura	80/20 Sem cura				80/20 1h cura			
Espessura (cm)	5	10	15	20	5	10	15	20
N fadiga	1E+07	2E+07	4E+07	9E+07	2E+07	5E+07	1E+08	2E+08
Mistura	AB 41				AB 68			
Espessura (cm)	5	10	15	20	5	10	15	20
N fadiga	1E+07	2E+07	4E+07	8E+07	1E+07	3E+07	6E+07	1E+08
Mistura	80/20 2h cura				Raspa			
Espessura (cm)	5	10	15	20	5	10	15	20
N fadiga	3E+07	6E+07	1E+08	3E+08	2E+07	4E+07	1E+08	3E+08

Anexo F – Vida de fadiga à diferentes espessuras e diferentes misturas asfálticas para Specht (2004)