

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

**EFEITOS DA ADIÇÃO DE CAL HIDRATADA NO  
COMPORTAMENTO MECÂNICO DE CONCRETOS  
ASFÁLTICOS PRODUZIDOS COM AGREGADO GRANÍTICO**

**Tatiani Melissa Paviani**

Porto Alegre  
2015

TATIANI MELISSA PAVIANI

**EFEITOS DA ADIÇÃO DE CAL HIDRATADA NO  
COMPORTAMENTO MECÂNICO DE CONCRETOS  
ASFÁLTICOS PRODUZIDOS COM AGREGADO GRANÍTICO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul,  
como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em  
Engenharia

Porto Alegre  
2015

PAVIANI, Tatiani Melissa

Efeitos da Adição de Cal Hidratada no Comportamento Mecânico de Concretos Asfálticos produzidos com agregado granítico. / Tatiani Melissa Paviani.

131p.

Orientadores: Washington Peres Núñez e 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. 2. Incorporação de cal hidratada. 3. Propriedades Mecânicas. 4. Fadiga. 5. Dano por Umidade Induzida.

**TATIANI MELISSA PAVIANI**

**EFEITOS DA ADIÇÃO DE CAL HIDRATADA NO  
COMPORTAMENTO MECÂNICO DE CONCRETOS  
ASFÁLTICOS PRODUZIDOS COM AGREGADO GRANÍTICO**

Esta dissertação de mestrado foi julgada adequada para a obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA, área de concentração Geotecnia, e aprovada em sua forma final pelos professores orientadores 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. Jorge Augusto Pereira Ceratti**  
DSc. pela Universidade Federal do Rio de Janeiro

**Prof. Washington Peres Núñez**  
Dr. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

**Prof. Carlos Torres Formoso**  
Coordenador do PPGEC/UFRGS

**BANCA EXAMINADORA**

**Prof. Glauco Tulio Pessa Fabbri**  
Dr. pela EESC-USP

**Prof. Lélío Antônio Teixeira Brito**  
PhD. pela University of Nottingham

**Prof. Luiz Antônio Bressani**  
PhD. Pelo Imperial College de Londres

Dedico este trabalho à minha mãe Marta, ao meu marido Ernani, pela ajuda, compreensão, amor, companheirismo e incentivo durante o período de seu desenvolvimento e à luz da minha vida, minha filha Antônia.

## **AGRADECIMENTOS**

Gostaria de agradecer a todos que de alguma forma contribuíram para que essa dissertação de mestrado fosse concluída. Foram muitas pessoas que me ajudaram e todas foram de extrema importância, sem a ajuda delas não teria conseguido chegar até o final.

Agradeço aos Professores Washington Peres Nuñez e Jorge Augusto Pereira Ceratti, orientadores deste trabalho, pela oportunidade, disponibilidade cedida e formação de qualidade.

Ao Professor Washington, que contribuiu e me aconselhou com muita dedicação e paciência, especialmente por sempre ter acreditado em mim, me transmitindo conhecimento e segurança. Obrigada pelos fundamentais ensinamentos.

Agradeço muito a toda equipe do LAPAV (Daniel Pinheiro Fernandes, Vinícius Alves, Lucas Pereira, Lucas Araguão, Rodrigo Silva, Isadora Castelli, Larissa Montagner, Kethelin Klagenberg, Graciele Bordin Colpo, Douglas Mocelin, Douglas Engelke, Maximiliano Cavalcanti e Fabio Conterato), por toda a ajuda na realização dos ensaios, e principalmente ao Eng. André Bock, pela disponibilidade, ajuda e paciência em sempre atender minhas dúvidas.

Agradeço aos professores do programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil pelo incentivo e formação, principalmente ao Professor Washington e Professor Luiz Bressani, que me acolheram quando cheguei à UFRGS.

Agradeço aos colegas do Mestrado que foram companheiros nessa jornada, e também me auxiliaram. Especial agradecimento à Eng. Lysiane Menezes Pacheco, William Fedrigo e Mozara Benetti.

À construtora Brasília Guaíba pela disponibilização dos agregados. À GRECA Asfaltos pela disponibilização dos ligantes e do aditivo melhorador de adesividade e também às empresas Belocal e Dagoberto Barcellos que me cederam as cales.

Ao Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes que permitiu a realização do curso de mestrado. Aos colegas do DNIT que me apoiaram principalmente, ao Eng. Vladimir Roberto Casa que como Superintendente Regional, não só me apoiou, mas também me incentivou a fazer o mestrado. Aos meus colegas do Setor de Projetos e Meio Ambiente,

Pedro Coutinho dos Santos, e as minhas colegas e amigas Suzan Pagnoncelli e Catarina Muñoz que sempre me ajudaram. À minha irmã de coração Suzi Pagnoncelli, sempre me dando força, principalmente quando eu pensava em desistir e me dizia: “Bora lá terminar isso aí, não dá pra morrer na praia né”.

À minha família toda, em especial à minha mãe que é um exemplo do que é ser forte, que sempre escalou a montanha da vida removendo pedras e plantando flores.

Por fim, quero fazer um agradecimento especial para duas pessoas muito mais do que especiais para mim. Ao meu marido Ernani, meu eterno namorado, meu amor e companheiro para todas as horas. Obrigada por sempre acreditar em mim, lutar ao meu lado, me compreender mesmo quando foi difícil e me ajudar em tudo o que foi possível. E o outro agradecimento especial, é para minha filha Antônia, que através do seu olhar e do seu sorriso, enche meu coração de esperança e me faz desfrutar do lado doce de viver.

Desistir...eu já pensei seriamente nisso, mas nunca me levei realmente a sério; é que tem mais chão nos meus olhos do que cansaço nas minhas pernas, mais esperança nos meus passos do que tristeza nos meus ombros, mais estrada no meu coração do que medo na minha cabeça.

*Cora Coralina*



## RESUMO

PAVIANI, T. M. Efeitos da Adição de Cal Hidratada no comportamento mecânico de concretos asfálticos produzidos com agregado granítico. 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

A presente pesquisa apresenta uma análise laboratorial da adesividade e do comportamento mecânico de concretos asfálticos elaborados com agregados de granito e com ligante convencional (CAP 50/70) e ligante modificado por polímero (AMP CAP 60/85), priorizando os efeitos decorrentes da incorporação de dois tipos de cales. A primeira, denominada cal calcítica (com elevado teor de óxido de cálcio) é oriunda do Estado de Minas Gerais e, a segunda, denominada cal dolomítica, produzida no Estado do Rio Grande do Sul. Para a dosagem das seis misturas estudadas foi utilizada a metodologia Marshall, sendo posteriormente realizados ensaios de Resistência à Tração por Compressão Diametral, Módulo de Resiliência, Dano por Umidade Induzida (AASHTO T 283/89) e Resistência à Fadiga utilizando-se o ensaio de Tração indireta por compressão diametral, no modo tensão controlada. De posse dos resultados laboratoriais foi realizada uma análise elástico - linear, utilizando o Programa Computacional EVERSTRESS 5.0, e aplicado os resultados de deformação nos modelos obtidos em laboratório para as seis misturas analisadas. Considerando este critério, pode-se observar que os melhores resultados foram obtidos para as misturas elaboradas com ligante modificado. Quando empregado o ligante convencional evidenciou-se a melhora do comportamento da resistência à Fadiga das misturas que tiveram incorporação de cal (aumento de até 330% quando empregada cal calcítica e de até 348% quando empregada cal dolomítica), enquanto que quando preparadas com ligante modificado por polímero, a mistura que apresentou melhores resultados foi a elaborada sem incorporação de cal. Outro fato constatado e importante diz respeito a interação entre a cal, o ligante e o agregado granítico, já que diferentemente do esperado, a incorporação de cales não ocasionou resultados satisfatórios na adesividade.

**Palavras-chave:** *pavimentação, propriedades mecânicas, misturas asfálticas, incorporação de cal, fadiga.*

## ABSTRACT

PAVIANI, T. M. Efeitos da Adição de Cal Hidratada no comportamento mecânico de concretos asfálticos produzidos com agregado granítico. 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

This research shows a laboratory test of adhesiveness and the mechanical behavior of asphalt concrete prepared with granitic aggregate and conventional binder (CAP 50/70) and polymer-modified binder (AMP CAP 60/85), prioritizing the effects resulting from the merger of two types of limes. The first, called calcite lime (with high content of calcium oxide), comes from the Brazilian State of Minas Gerais; the second, the dolomitic lime, is produced in the State of Rio Grande do Sul. The Marshall method assessed the six mixtures studied; subsequently, Tensile Strength for Diametral Compression, Resilience Module, Damage Induced by Humidity (AASHTO T 283/89) and Resistance to Fatigue were tested by means of indirect traction by diametrical compression in controlled stress mode. A linear elastic analysis followed the laboratory results, using Computational Program EVERSTRESS 5.0; deformation results obtained in laboratory models for the six analyzed mixtures were applied. In accordance with this criterion, the best results point to asphalt mixtures prepared with modified binder. The use of conventional binder showed improvement in the fatigue resistance behavior of mixtures that take lime incorporation (increase of up to 330% with calcite lime, and up to 348% with dolomitic lime); however, when prepared with polymer-modified binder, the mixture that showed the best results did not have the addition of lime. Another noteworthy fact confirmed concerns the interaction amongst the lime, the binder and the granitic aggregate: unlike expected, the incorporation of limes did not convey satisfactory results in adhesiveness.

**Keywords:** *pavements; mechanical properties; asphalt mixture; lime incorporation; fatigue.*

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>20</b>
1.1 OBJETIVOS .....	21
1.1.1 Objetivo principal .....	21
1.1.2 Objetivos secundários .....	22
1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO .....	22
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>24</b>
2.1 DEFEITOS EM PAVIMENTOS – PRINCIPAIS MECANISMOS DE DETERIORAÇÃO .....	24
2.1.1 Módulo de Resiliência .....	28
2.1.2 Fadiga em Pavimentos Asfálticos .....	29
2.1.3 Deformações Permanentes .....	35
2.1.4 Perda de Adesividade entre o Agregado e o Ligante Asfáltico .....	38
2.1.5 Propriedades dos Agregados e dos Ligantes Asfálticos .....	41
2.1.6 Propriedades das misturas asfálticas .....	43
2.2 USO DA CAL HIDRATADA NA PAVIMENTAÇÃO ASFÁLTICA .....	45
2.2.1 Definições e Classificação .....	45
2.2.2 Aplicações Gerais .....	50
2.2.3 Efeitos da Incorporação de cal hidratada nas misturas asfálticas .....	52
2.2.4 Formas de Incorporação da Cal nas Misturas Asfálticas .....	55
<b>3 MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>59</b>
3.1 Materiais .....	59
3.1.1 Agregados Pétreos .....	59
3.1.2 Ligantes Asfálticos .....	62
3.1.3 Aditivo Melhorador de Adesividade .....	64
3.1.4 Cales .....	64

3.1.5	Confeção dos Corpos de Prova.....	66
3.2	MÉTODOS.....	68
3.2.1	Determinação das Curvas Granulométricas .....	68
3.2.2	Dosagem Marshall.....	71
3.2.3	Resistência à tração por compressão diametral (RT) .....	74
3.2.4	Módulo de resiliência (MR) .....	76
3.2.5	Resistência à Fadiga .....	78
3.2.6	Resistência ao dano por umidade induzida (AASHTO T 283-89 ).....	82
<b>4</b>	<b>APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS .....</b>	<b>85</b>
4.1	PARÂMETROS DA DOSAGEM MARSHALL.....	85
4.2	ADESIVIDADE DO AGREGADO/LIGANTE .....	89
4.3	RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL .....	92
4.4	MÓDULO DE RESILIÊNCIA.....	95
4.5	ANÁLISE DO MÓDULO DE RESILIÊNCIA E DA RESISTÊNCIA À TRAÇÃO....	98
4.6	VIDA DE FADIGA.....	100
4.6.1	Vida de Fadiga em Função da Diferença de Tensões ( $\Delta\sigma$ ) .....	100
4.6.2	Vida de Fadiga em Função da Tensão de Tração.....	101
4.6.3	Vida de Fadiga em Função da Deformação Específica Inicial.....	102
4.7	Resistência ao dano por umidade induzida (AASHTO T 283-89 ).....	104
<b>5</b>	<b>ANÁLISE PARAMÉTRICA DE PAVIMENTOS CONSTITUÍDOS PELAS MISTURAS ESTUDADAS.....</b>	<b>107</b>
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>121</b>
6.1	CONCLUSÕES.....	121
6.2	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	124
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>125</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: resposta de um pavimento flexível quando submetido a um carregamento uniforme (adaptado de Owende et al., 2001 apud Dias, 2009) .....	25
Figura 2: zonas de tração e compressão de um pavimento sujeito ao carregamento de um veículo (adaptado de Castell et al., 2000 apud Dias, 2009).....	26
Figura 3: Deformações sob cargas repetidas (adaptado de Huang, 2004).....	28
Figura 4: Tensões no interior de um pavimento (MEDINA e MOTTA, 2005) .....	30
Figura 5: Estágios existentes em um Processo de Fadiga (BERNUCCI et al., 2008).....	30
Figura 6: Esquema do ensaio de compressão diametral (BERNUCCI, et al., 2008) .....	34
Figura 7: Representação do afundamento ou deformação permanente (adaptado FHWA, 1994) .....	36
Figura 8: Efeito de aditivos na deformação permanente (Adaptado de KIM et al., 1995).....	38
Figura 9: Influência do agregado e do ligante no desempenho do CBUQ (FHWA, 2002) .....	43
Figura 10: Representação do ciclo da cal (adaptado do site Belocal e IME) .....	47
Figura 11: Pedreira Capitão Jango II – Camaquã/RS.....	59
Figura 12: Brita 3/4", Brita 3/8" e Pó-de-pedra.....	60
Figura 13: Curvas granulométricas dos agregados e das cales.....	62
Figura 14: Preparação das bandejas para a Moldagem Marshall, com as diversas frações de materiais e cal .....	67
Figura 15: Corpos de Prova moldados pelo Método Marshall.....	67
Figura 16: composição granulométrica mistura de referência com ligante convencional e modificado.....	69
Figura 17: composição granulométrica mistura com 1% de cal calcítica .....	70
Figura 18: composição granulométrica mistura com 1% de cal dolomítica .....	70
Figura 19: Demonstração da importância da dosagem adequada (adaptado de OHL BRASIL) .....	71
Figura 20: Equipamento para ensaio de resistência à tração .....	76
Figura 21: Corte esquemático do equipamento de módulo de resiliência (Specht, 2004). .....	77
Figura 22: Equipamento utilizado pelo LAPAV/UFRGS para realização do ensaio de fadiga por compressão diametral.....	79
Figura 23: sistema de aquisição e controle de dados do equipamento de ensaio de fadiga por compressão diametral (Colpo, 2014).....	80

Figura 24: Tela principal do SEEPAV 8200 .....	80
Figura 25: Representação das tensões no centro da amostra de um corpo de prova cilíndrico	81
Figura 26: Parâmetros de Dosagem Marshall (CAP 50/70) das misturas com incorporação de Cal calcítica (CC) e cal dolomítica (CD) em relação à mistura de Referência .....	87
Figura 27: Parâmetros de Dosagem Marshall (AMP CAP 60/85) das misturas com incorporação de Cal calcítica (CC) e cal dolomítica (CD) em relação à mistura de Referência .....	88
Figura 28: Amostra ensaiada .....	90
Figura 29: Antes e depois da amostra ensaiada com ligante modificado sem cal.....	91
Figura 30: Antes e depois da amostra ensaiada com ligante modificado +1% de cal calcítica	91
Figura 31: Antes e depois da amostra ensaiada com ligante modificado +1% de cal dolomítica .....	91
Figura 32: Antes e depois da amostra ensaiada com ligante convencional+0,3% de DOPE...	92
Figura 33: Resistência à tração por compressão diametral a 25° das seis misturas analisadas onde: Ref são misturas sem incorporação de cal; CC são misturas com incorporação de Cal Calcítica e CD são misturas com incorporação de Cal Dolomítica.....	93
Figura 34: Resistência à tração por compressão diametral a 25° das três misturas elaboradas com Ligante Convencional.....	93
Figura 35: Resistência à tração por compressão diametral a 25° das três misturas elaboradas com Ligante Modificado .....	94
Figura 36: Módulo de Resiliência das seis misturas analisadas .....	96
Figura 37: Módulo de Resiliência das três misturas elaboradas com Ligante Convencional ..	96
Figura 38: Módulo de Resiliência das três misturas elaboradas com Ligante Modificado .....	97
Figura 39: Relação MR/RT das seis misturas estudadas.....	99
Figura 40: Vida de Fadiga em função da Diferença de tensões para as seis misturas estudadas .....	101
Figura 41: Vida de Fadiga em função da Tensão de Tração para as seis misturas estudadas	102
Figura 42: Vida de Fadiga em função da Deformação específica inicial para as seis misturas estudadas.....	103
Figura 43: Resultados dos ensaios de Resistência à Tração (AASHTO T 283-89) .....	105
Figura 44: Resultados dos ensaios de Resistência Retida à Tração (AASHTO T 283-89)....	106
Figura 45: Esquema genérico da estrutura analisada.....	107
Figura 46: Tela inicial do Software EVERSTRESS 5.0 .....	108
Figura 47: Tela do software com os dados de carregamento e pontos de avaliação .....	109

Figura 48: Tela do software com dados de entrada (módulo de resiliência, coeficiente de Poisson e espessura das camadas) .....	109
Figura 49: Esquema do carregamento utilizado .....	110
Figura 50: Vida de Fadiga em função da deformação específica inicial considerando diferentes espessuras de camadas asfálticas e os respectivos módulos de resiliência das misturas.....	112
Figura 51: Vida de Fadiga em função da deformação específica inicial com diferentes espessuras de camada asfáltica.....	113
Figura 52: Vida de Fadiga em função da deformação específica inicial com diferentes espessuras de camada asfáltica das misturas elaboradas com ligante convencional.....	114
Figura 53: Vida de Fadiga em função da deformação específica inicial com diferentes espessuras de camada asfáltica das misturas elaboradas com ligante modificado .....	114
Figura 54: Relações das Vidas de Fadiga das misturas com ligante convencional/modificado e cales com a Vida de Fadiga da mistura referência com ligante convencional (Ref 50/70)....	116
Figura 55: Variações em percentual das Vidas de Fadiga das misturas com ligante convencional/modificado e cales com a Vida de Fadiga da mistura referência com ligante convencional (Ref 50/70) .....	116
Figura 56: Variações das Vidas de Fadiga das misturas com ligante convencional e cales com a Vida de Fadiga da mistura referência com ligante convencional (Ref 50/70).....	118
Figura 57: Variações das Vidas de Fadiga em percentual das misturas com ligante modificado com a Vida de Fadiga da mistura referência com ligante convencional (Ref 50/70).....	119
Figura 58: Variações das Vidas de Fadiga em percentual das misturas com ligante modificado com a Vida de Fadiga da mistura referência com ligante convencional (Ref 50/70).....	120

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Categorias de defeitos dos pavimentos (MT/DNER/IR/98).....	27
Tabela 2: fatores que afetam a rigidez e o comportamento à fadiga de concreto asfálticos ....	32
Tabela 3: Fatores que afetam a deformação permanente de misturas asfálticas (adaptado de Souza et al., 1991) .....	37
Tabela 4: Características desejável de materiais na pavimentação em relação à adesividade. Fonte: Hicks, 1991 apud Bock, 2009 .....	40
Tabela 5: Elementos químicos presentes na cal .....	47
Tabela 6: Concentração de Cálcio e Magnésio dos cales .....	49
Tabela 7: Características Químicas das cales .....	49
Tabela 8: Características Físicas das cales .....	50
Tabela 9: Influência da incorporação de cal hidratada em misturas de concreto asfáltico (CA) .....	55
Tabela 10: Formas de incorporação de Cal na Mistura Asfáltica (adaptada de Report to the European Lime Association, 2010) .....	57
Tabela 11: Características dos agregados .....	61
Tabela 12: Distribuição granulométrica dos agregados pétreos e das cales.....	61
Tabela 13: Propriedades do ligante convencional (CAP 50/70) .....	63
Tabela 14: Propriedades do ligante modificado por polímero elastomérico (AMP CAP 60/85) .....	63
Tabela 15: Especificações Técnicas do DOPE.....	64
Tabela 16: Características químicas das cales utilizadas na pesquisa.....	66
Tabela 17: Características das Misturas Asfálticas estudadas.....	73
Tabela 18: Temperaturas de mistura e de compactação para laboratório.....	74
Tabela 19: Resultados para misturas com ligante modificado CAP 50/70 nos respectivos teores de projeto (Referência, Cal Calcítica e Cal Dolomítica) .....	86
Tabela 20: Resultados para misturas com ligante modificado AMP CAP 60/85 nos respectivos teores de projeto (Referência, Cal Calcítica e Cal Dolomítica) .....	86
Tabela 21: Resultados da resistência à Tração das misturas asfálticas estudadas.....	92
Tabela 22: Resultados obtidos de Módulo de Resiliência.....	95
Tabela 23: MR e RT a 25° das seis misturas asfálticas estudadas .....	98
Tabela 24: Valores dos Parâmetros do Modelo “k <sub>1</sub> ” e “n <sub>1</sub> ” .....	100
Tabela 25: Valores dos Parâmetros do Modelo “k <sub>2</sub> ” e “n <sub>2</sub> ” .....	102



Tabela 26: Valores dos Parâmetros do Modelo “ $k_3$ ” e “ $n_3$ ” .....	103
Tabela 27: Resultados gerais dos ensaios de dano por umidade induzida (AASHTO T 283-89) .....	104
Tabela 28: Características estruturais dos pavimentos analisados .....	108
Tabela 29: Valores de deformações obtidos nas simulações e respectivas Vidas de Fadiga .	111
Tabela 30: Relações entre as Vidas de Fadiga das misturas com ligante convencional/modificado e cales com a Vida de Fadiga da mistura referência (sem cal e ligante convencional).....	115
Tabela 31: Relações entre as Vidas de Fadiga das misturas com cal calcítica e dolomítica com a Vida de Fadiga da mistura referência elaborada com ligante convencional.....	117
Tabela 32: Relações entre as Vidas de Fadiga das misturas com cal calcítica e dolomítica com a Vida de Fadiga da mistura referência elaborada com ligante modificado.....	120

## LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

AASHTO: *American Association of State Highway and Transportation Officials*

ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas

ABPC: Associação Brasileira de Produtores de Cal

AMP: Asfalto modificado por polímero

ANP: Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis

ASTM: *American Society of Testing and Materials*

CA: Concreto Asfáltico

CAP: Cimento Asfáltico de Petróleo

CBUQ: Concreto Betuminoso Usinado a Quente

CC 50/70: Mistura elaborada com ligante convencional e cal calcítica

CC 60/85: Mistura elaborada com ligante modificado e cal calcítica

CD 50/70: Mistura elaborada com ligante convencional e cal dolomítica

CD 60/85: Mistura elaborada com ligante modificado e cal dolomítica

D: Diâmetro do Corpo de Prova

DAER: Departamento Autônomo de Estradas de Rodagem

DNER: Departamento Nacional de Estradas de Rodagem

DNIT: Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes

DOPE: Aditivo Melhorador de Adesividade

F: Carga Aplicada no Corpo de Prova

H: Altura do corpo de prova

$K_1, n_1; K_2, n_2; K_2, n_2$ : Parâmetros de fadiga determinados em laboratório

LPAV: Laboratório de Pavimentação

MR: Módulo de Resiliência

NBR: Norma Brasileira

$N_f$ : Vida de Fadiga

PA: Ponto de Amolecimento

PEN: Penetração

$R^2$ : coeficiente de ajuste do modelo

RBV: Relação Betume Vazios

Ref 50/70: Mistura de referência elaborada com ligante convencional sem cal

Ref 60/85: Mistura de referência elaborada com ligante modificado sem cal

RRT: Resistência Retida à Tração (%)

RT<sub>1</sub>: Resistência à Tração de Amostras com Condicionamento

RT<sub>2</sub>: Resistência à Tração de Amostras sem Condicionamento

RT: Resistência à Tração por Compressão Diametral

T: Temperatura

UFRGS: Universidade Federal do Rio Grande do Sul

VAM: Vazios do Agregado Mineral

VV: Volume de Vazios

$\epsilon_i$  : Deformação específica inicial

$\epsilon_r$  : Deformação recuperável para um determinado número de ciclos

$\sigma_t$  : Tensão de Tração

$\sigma_d$  : Tensão aplicada dinamicamente

$\Delta$ : Deslocamento Total

$\Delta\sigma$ : Diferença entre tensões vertical (de compressão) e horizontal (de tração)

$\mu$ : Coeficiente de Poisson

(%RT): Nível de Carga em relação à RT

# 1 INTRODUÇÃO

O Modal Rodoviário no Brasil é, sem dúvida, o principal sistema logístico para transporte de cargas. Com o aumento constante da frota de veículos, excesso de peso das cargas transportadas e o aumento da pressão de inflação dos pneus, os pavimentos acabam por apresentar defeitos precocemente.

A degradação dos revestimentos asfálticos está relacionada a três principais mecanismos que são a deformação permanente, as trincas por fadiga e as trincas térmicas. Objetivando reduzir a ocorrência desses defeitos, faz-se necessário a utilização de materiais com desempenho superior e que os pavimentos sejam dimensionados considerando as condições de carregamento.

Considerando que a estrutura rodoviária no Brasil foi priorizada desde os meados do século passado, é fundamental para o desenvolvimento do país que se tenha rodovias com boas condições de trafegabilidade e segurança aos usuários, proporcionando benefícios diretos como a melhoria dos níveis de conforto e segurança, possibilitando uma redução significativa dos custos operacionais e também, provendo a logística da produção de bens e serviços. Pode – se destacar ainda, que a adequada capacidade das rodovias proporciona uma estrutura de serviços competitiva e com padrões de desempenho satisfatórios, acelerando o progresso socioeconômico do país, refletindo na qualidade de vida, estruturação espacial das comunidades, além de promover o escoamento da produção agrícola e industrial, incrementando assim as riquezas nacionais.

Os concretos asfálticos (CA) são os materiais de uso mais corrente no Brasil para a pavimentação asfáltica, representando cerca de 98% dos revestimentos. Este tipo de revestimento tem sido empregado em diferentes tipos de pavimentos, sob diferentes solicitações, que podem ser tanto vias com baixo volume de tráfego como aquelas que registram tráfego intenso e pesado, como nas autoestradas, corredores de ônibus, entre outros (BERNUCCI et al., 2008).

Durante os últimos anos tem aumentado o interesse e o uso da cal hidratada como agente estabilizador de misturas asfálticas quentes em diversos países e também no Brasil, conforme

estudos publicados por Little e Seebaly (2006), Núñez et al. (2007) e Bock (2012). É aconselhável agregar cal hidratada nas misturas asfálticas a quente, por vários aspectos dentre os quais se pode citar a melhoria da adesividade agregado-ligante, o retardamento do trincamento, e o aumento da resistência à deformação permanente. Funciona também como fíler modificador de viscosidade, reduz a sensibilidade à umidade, evita o envelhecimento prematuro da capa asfáltica, prolongando a sua vida útil. Além de melhorar a coesão das misturas, é um aditivo de baixo custo (Little e Seebaly, 2006).

Segundo Núñez et al. (2007), a cal hidratada tem se apresentado como uma boa opção para prolongar a vida útil do pavimento, elevando seu desempenho quanto à resistência à fadiga e minimizando as deformações permanentes. A incorporação da cal hidratada promove o enrijecimento da mistura, retardando o trincamento ocasionado pela fadiga, e tornando a mesma mais resistente a deformações permanentes e melhorando ainda a adesividade entre o agregado e a mistura. Outra característica observada é que a cal reduz o teor de ligante betuminoso, diminuindo os custos para a execução do pavimento.

Resultados obtidos em pesquisas relatados por Little e Seebaly (2006) e por Bock (2012) mostraram a grande influência da cal hidratada na qualidade e durabilidade dos pavimentos asfálticos. O produto proporciona ao ligante betuminoso maior viscosidade e impermeabilidade, conseqüentemente tornando a mistura mais resistente à ação prolongada das águas e da temperatura. Por diminuir os vazios e ter alto poder alcalino, a cal nas misturas retarda a oxidação do asfalto, pela ação do calor e do ar, e também diminui a sensibilidade térmica da capa asfáltica.

## 1.1 OBJETIVOS

Diante do exposto, os objetivos do trabalho estão classificados em principal e secundário e são apresentados nos próximos itens.

### 1.1.1 Objetivo principal

A pesquisa relatada nesta Dissertação teve por objetivo principal quantificar os efeitos da adição de cal hidratada nas misturas asfálticas a quente, no que se refere a resistência à fadiga e dano por umidade induzida.

### 1.1.2 Objetivos secundários

Para alcançar o objetivo principal, os objetivos secundários propostos ao trabalho foram:

- a) Determinar os parâmetros de dosagem Marshall (Volume de Vazios – VV, Vazios do Agregado Mineral – VAM, Relação Betume Vazios – RBV, Estabilidade e Fluência);
- b) Analisar a influência da incorporação de cal nos parâmetros mencionados;
- c) Analisar o desempenho das misturas estudadas, avaliando o teor de incorporação e o tipo de cal utilizada (calcítica ou dolomítica), bem como a utilização de ligante convencional e modificado;
- d) Realização de ensaios de caracterização mecânica como Resistência à Tração, Módulo de Resiliência, e também Dano por Umidade Induzida.
- e) Analisar a Vida de Fadiga dessas misturas asfálticas, usando o ensaio de tração indireta por compressão diametral e o Software EVERSTRESS 5.0.

## 1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO

O presente trabalho está organizado em cinco capítulos que descrevem os aspectos fundamentais para o desenvolvimento dos objetivos apresentados.

O capítulo 1 é a INTRODUÇÃO na qual se apresentou o tema da dissertação, bem como seu enquadramento no desenvolvimento do presente trabalho, além de apresentar os objetivos que foram propostos para a pesquisa.

No capítulo 2, denominado REVISÃO BIBLIOGRÁFICA, abordou-se temas relacionados aos efeitos da adição da cal hidratada nas propriedades mecânicas de concretos asfálticos, os mecanismos de modificação, ação da forma de incorporação, bem como influência do tipo de agregado utilizado. Faz-se ainda, uma rápida revisão sobre os principais mecanismos de degradação dos pavimentos asfálticos, dando enfoque principalmente para os problemas relacionados à fadiga e deformações permanentes. A perda de adesividade entre o agregado e o ligante também é referenciada, considerando que segundo pesquisas que vem sendo desenvolvida a cal é um ótimo melhorador de adesividade.

No capítulo 3, denominado MATERIAIS E MÉTODOS LABORATORIAIS, são apresentados os materiais utilizados na composição das misturas asfálticas, indicando suas procedências e características assim como a descrição dos procedimentos laboratoriais realizados.

No capítulo 4 é feita a APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS dos ensaios laboratoriais executados.

No capítulo 5, através de uma ANÁLISE PARAMÉTRICA foi feita uma avaliação da Vida de Fadiga das estruturas adotadas utilizando-se o critério da deformação específica inicial.

Por fim, no capítulo 6, CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS, a partir dos resultados obtidos na pesquisa, foram apresentadas as conclusões e sugestões para os próximos trabalhos.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo serão referenciados alguns dos principais assuntos de interesse para a realização e desenvolvimento da pesquisa. Inicialmente, tem-se uma abordagem sobre os mecanismos de deterioração dos pavimentos, dando enfoque principalmente ao trincamento por fadiga e ao dano por umidade.

Serão abordados também os efeitos e a importância da adição da cal hidratada no desempenho e na durabilidade dos pavimentos, permitindo assim, que dois mecanismos de deterioração sejam superados.

Por fim, serão apresentadas as formas de incorporação de cal e a influência do método de adição nas misturas asfálticas.

### 2.1 DEFEITOS EM PAVIMENTOS – PRINCIPAIS MECANISMOS DE DETERIORAÇÃO

Ao longo da sua vida útil, os pavimentos rodoviários sofrem processos de degradação devido à ação do tráfego atuante e também às condições climáticas. Como consequência do aumento do volume de veículos e do excesso de carga, tem-se como resultado a deterioração prematura e conseqüentemente o aumento dos custos de transportes.

A degradação de pavimentos está associada a vários defeitos, dentre eles pode-se citar as deformações permanentes excessivas e o trincamento por fadiga (defeitos que estão mais intimamente relacionados com o tráfego imposto e com a estrutura do pavimento). Pode-se identificar ainda as trincas por retração térmica e a desagregação, que estão relacionadas com as condições climáticas (MEDINA e MOTTA, 2005).

O desempenho dos pavimentos é de fundamental importância para o contexto econômico atual, por isso a necessidade de buscar soluções que promovam uma melhora significativa no que se refere aos principais mecanismos de degradação dessas estruturas.

Para tanto, além dos requisitos básicos para a obtenção de misturas adequadas, que passam pela escolha e proporcionalidade dos materiais, como boa graduação dos agregados e definição do teor de ligante adequadamente, a incorporação de novos materiais que possuam



bom desempenho e baixo custo, vem sendo estudada por diversos pesquisadores, com o objetivo de aprimorar a qualidade das misturas, mitigar as formas de deterioração prematura dos revestimentos, prolongando assim sua vida útil.

O decréscimo da condição ou da serventia do pavimento ao longo do tempo é conhecido como deterioração do pavimento. Como já mencionado anteriormente, os principais problemas relacionados ao desempenho dos pavimentos e que merecem especial atenção devido à magnitude que ocorrem e, principalmente, porque são defeitos estruturais é o acúmulo de deformação permanente nas trilhas de roda, que normalmente ocorre nos primeiros anos de vida do pavimento, devido à consolidação e tensões cisalhantes, e a fadiga da capa asfáltica, que geralmente ocorre em pavimentos mais envelhecidos (ROBERTS et al.,1991).

A ação gerada pelo tráfego atuante sobre o pavimento ocasiona estados de tensões e deformações que acabam comprometendo o desempenho destas estruturas que se devem principalmente ao acúmulo excessivo de deformações permanentes e ao trincamento por fadiga.

Como representado na Figura 1 e 2, a ação do tráfego atuante dá origem à existência de duas zonas críticas do ponto de vista estrutural dos pavimentos flexíveis. A primeira localiza-se na base das camadas betuminosas, onde se verificam maiores tensões de tração, que podem acarretar no trincamento do pavimento por fadiga. Na segunda zona, localizada na face superior do solo de fundação, se verificam as maiores tensões de compressão, que podem dar origem à deformação permanente.

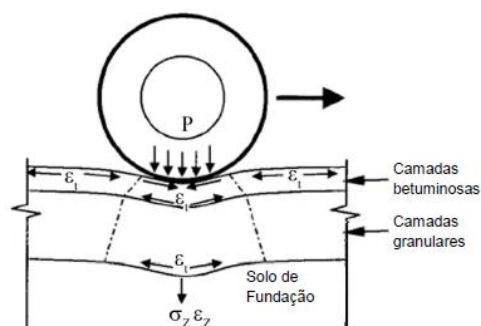


Figura 1: resposta de um pavimento flexível quando submetido a um carregamento uniforme (adaptado de Owende et al., 2001 apud Dias, 2009)

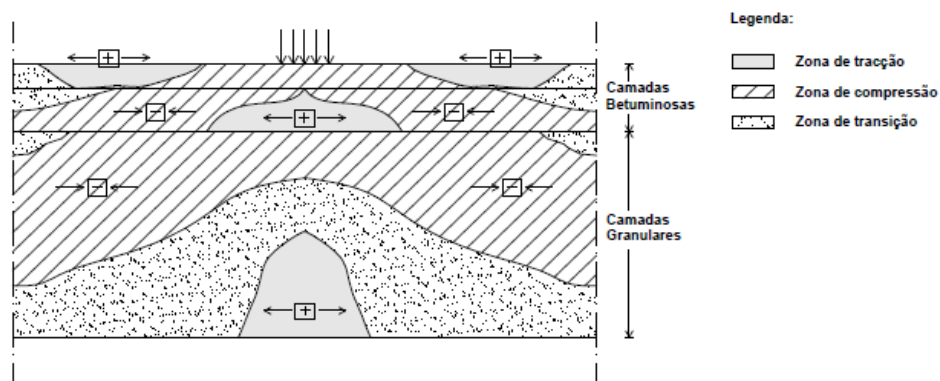


Figura 2: zonas de tração e compressão de um pavimento sujeito ao carregamento de um veículo (adaptado de Castell et al., 2000 apud Dias, 2009).

Outros mecanismos de degradação dos pavimentos são o trincamento a baixas temperaturas e tempos reduzidos de aplicação de carga e trincamento por retração devido a variações térmicas.

Bock (2012) referenciou que o trincamento a baixas temperaturas e tempos reduzidos de aplicação de carga ocorre, porque nessas condições a mistura pode ser considerada como sendo um material elástico, com elevado módulo, contudo de comportamento frágil. Se a tensão de tração induzida pelo tráfego for demasiada, irá ocorrer o surgimento de trincas.

Já o trincamento por retração devido às variações térmicas ocorre quando a baixas temperaturas as misturas tendem a sofrer uma diminuição de volume, ou seja, retração. Como as misturas se encontram impedidas de realizar movimentos horizontais, as variações térmicas promovem tensões de tração. Por outro lado, o módulo das misturas asfálticas aumenta à medida que a temperatura é reduzida, o que acarreta em maiores tensões em resultado dessas deformações. Sendo estas tensões elevadas, poderão ocorrer trincas de contração. A importância deste aspecto depende da sensibilidade da mistura a variações térmicas e das condições climáticas a que a mistura está sujeita.

Outro defeito que deve ser considerado é a perda de adesividade entre o ligante asfáltico e os agregados de uma mistura betuminosa e pode ser associado a dois mecanismos: perda de adesão e perda de coesão. A perda de adesão está ligada à entrada de água entre o ligante e o agregado e ao descolamento do filme asfáltico da superfície do agregado. A perda de coesão está ligada à redução de rigidez do cimento asfáltico e ao enfraquecimento das ligações

ligante/agregado. Estes dois fatores estão intimamente relacionados e, então, o dano causado pela umidade em misturas asfálticas é a combinação entre estes dois fatores.

Em misturas asfálticas, a perda de adesão entre agregado e ligante está correntemente atrelada a três fatores: o primeiro que se pode citar é a incompatibilidade entre a constituição mineralógica do agregado e a constituição físico-química do material betuminoso; o segundo seria a ocorrência de umidade e por fim a presença de sujeira e finos na superfície do agregado. Essa perda de adesão do ligante asfáltico com a superfície do agregado (fratura adesiva) bem como a fratura do próprio filme de ligante (fratura coesiva), quer seja na presença de água ou não, é o princípio de muitos tipos de defeitos em pavimentos, incluindo trincamento por fadiga, deformação permanente e dano por umidade (LYTTON, 2004).

Tabela 1: Categorias de defeitos dos pavimentos (MT/DNER/IR/98)

Categoria do Defeito	Causa Genérica	Causa Específica
Trincamento	Associada com Tráfego	Cargas Repetidas (Fadiga)
		Carga Excessiva
	Não associada com Tráfego	Mudanças de Umidade
		Mudanças Térmicas
		Retração (Propagação)
Deformação	Associada com Tráfego	Carga Excessiva (Cisalhamento)
		Fluência Plástica
		Densificação (Compactação)
	Não associada com o Tráfego	Expansão
Consolidação de substratos		
Desagregação	Associada com o Tráfego	Degradação do Agregado
	Não associada com o Tráfego	Falta de qualidade dos Materiais

\*Os defeitos são relacionados com a ação do tráfego e as condições ambientais

### 2.1.1 Módulo de Resiliência

Resiliência é definida como a capacidade de um material absorver energia quando deformado elasticamente e quando ocorre o descarregamento sua energia é recuperada.

O ensaio de tração por compressão diametral (tração indireta) indireta com carregamento repetido, utilizado para determinação do módulo de resiliência, simula o comportamento mecânico da mistura asfáltica, na zona onde ocorrem as deformações específicas de tração, responsáveis pela fadiga da camada. Contudo, camadas asfálticas apresentam comportamento visco-elasto-plástico, considerando que sofrem deformações plásticas em cada aplicação de carga e os materiais que constituem a estrutura de um pavimento, quando submetidos a carregamentos dinâmicos, de curta duração e sob tensões muito abaixo de sua plastificação, apresentam comportamento aproximadamente elástico, não necessariamente linear.

A Figura 3 mostra a deformação de um corpo de prova submetido a um carregamento cíclico, onde é possível identificar um acúmulo de deformações plásticas no estágio inicial, que tende a se estabilizar com o aumento do número de repetições.

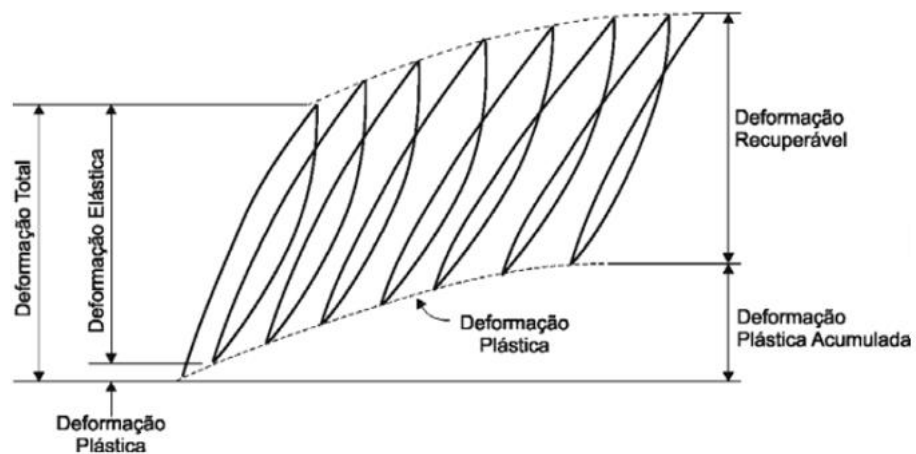


Figura 3: Deformações sob cargas repetidas (adaptado de Huang, 2004).

Segundo MOTTA et al., 2002, pode-se afirmar genericamente que o módulo de resiliência:

- É variável com a granulometria da mistura sendo maior quanto mais grossa for a faixa adotada;

- É variável com o ligante asfáltico sendo maior quanto menor a penetração do asfalto ou maior a sua viscosidade, não sendo muito sensível ao teor de asfalto, desde que dentro da faixa normal de dosagem.
- Outros fatores influenciam também, tais como a relação ligante/fíler e a própria natureza do fíler.

### 2.1.2 Fadiga em Pavimentos Asfálticos

Wesseling (2002) relata que o trincamento por fadiga é definido como a degradação do material sob carregamento repetido, sendo reconhecida como uma das principais causas da deterioração ou degradação dos materiais dos pavimentos. O trincamento por fadiga tem origem nas regiões de máximas tensões ou deformações de tração, já que se verifica que os materiais são mais resistentes a carregamentos repetidos de compressão do que de tração. Estas máximas tensões ou deformações ocorrem naturalmente na camada do pavimento com maior rigidez.

Nas estruturas dos pavimentos asfálticos, as misturas são frequentemente submetidas a carregamentos de curtos intervalos de duração pela passagem de veículos, fazendo com que estas cargas geradas resultem em degradações que propiciam a perda de rigidez do material e, conseqüentemente, por repetição, conduzem o fenômeno de fadiga (DI BENEDETTO e DE LA ROCHE, 1998).

As cargas aplicadas ao pavimento não provocam a imediata ruptura da estrutura. No entanto, sua repetição possui efeito acumulativo, o que pode levar à ruptura do material, fissuração por fadiga (PERRET, 2003).

Na Figura 4 estão demonstradas as solicitações sofridas pela estrutura do pavimento devido à repetição das cargas das rodas aplicadas pela passagem dos veículos. É possível identificar as tensões geradas e como fica sua distribuição em relação à profundidade, bem como a deformação de tração sofrida na fibra inferior da camada asfáltica. Na superfície do pavimento é aplicada uma carga vertical de compressão, e nas fibras inferiores da camada asfáltica surgem tensões de tração e de compressão devido ao carregamento e descarregamento repetido.

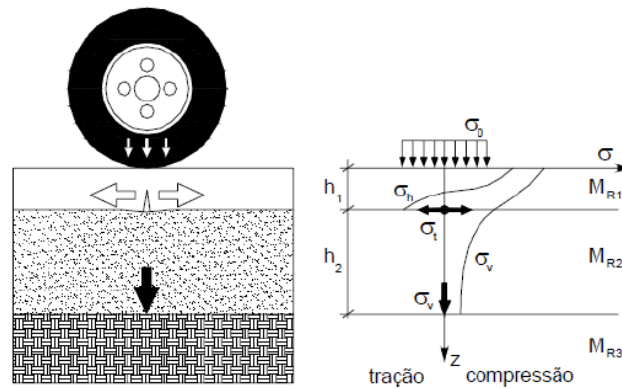


Figura 4: Tensões no interior de um pavimento (MEDINA e MOTTA, 2005)

A fadiga ocorre por meio de ações mecânicas e/ou térmicas que afetam a vida útil do material. Segundo a ASTM (1979), o fenômeno de fadiga é “o processo da mudança estrutural permanente, progressiva e localizada que ocorre em um ponto do material sujeito a tensões de amplitudes variáveis que produzem as fissuras que conduzem para totalizar a falha após um determinado número de ciclos”.

No processo de fadiga de uma estrutura sujeita a um carregamento cíclico, são identificados diversos estados, conforme descrito abaixo e ilustrado na Figura 5 (BERNUCCI et al., 2008).

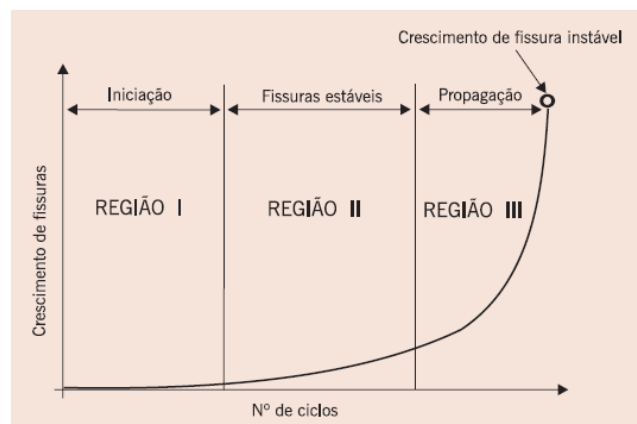


Figura 5: Estágios existentes em um Processo de Fadiga (BERNUCCI et al., 2008)

Na Região I é possível identificar a ocorrência das primeiras mudanças microestruturais, com o surgimento das microfissuras, a densidade dos deslocamentos cresce e as zonas de danos irreversíveis se iniciam.

A Região II é caracterizada pelas microfissuras originadas pela união das microfissuras.

Por fim, na Região III ocorre o crescimento das microfissuras provocando rapidamente o colapso total.

Dentre os principais fatores que afetam a resistência à fadiga das misturas betuminosas, se pode citar (PINTO, 1991):

#### 1. Fatores de Carga

- a) Magnitude do carregamento
- b) Tipo do carregamento, tensão ou deformação controlada
- c) Frequência, duração e intervalo de tempo entre as aplicações sucessivas do carregamento
- d) História de tensões: carregamento simples ou composto
- e) Forma do carregamento: triangular, quadrado, etc

#### 2. Fatores de Mistura

- a) Tipo do agregado, forma e textura
- b) Granulometria do agregado
- c) Penetração do asfalto
- d) Teor de asfalto
- e) Temperatura

#### 3. Fatores Ambientais

- a) Temperatura
- b) Umidade

#### 4. Outras variáveis

- a) Módulo Resiliente ou de Rigidez
- b) Índice de vazios

A tabela 2 faz uma síntese dos principais parâmetros da mistura que afetam o comportamento à fadiga dos concretos asfálticos.

Tabela 2: fatores que afetam a rigidez e o comportamento à fadiga de concreto asfálticos

Fator	Variação do fator	Efeito de Variação do Fator		
		Na rigidez	Na vida de fadiga em tensão controlada	Na vida de fadiga em deformação controlada
Penetração do asfalto	Decresce	Aumenta	Aumenta	Decresce
Teor de asfalto	Aumenta	Aumenta <sup>a</sup>	Aumenta <sup>a</sup>	Aumenta <sup>b</sup>
Tipo do agregado	Aumenta a rugosidade e angularidade	Aumenta	Aumenta	Decresce
Granulometria do agregado	Aberta a densa	Aumenta	Aumenta	Decresce <sup>b</sup>
Índice de vazios	Decresce	Aumenta	Aumenta	Decresce <sup>b</sup>
Temperatura	Decresce	Aumenta	Aumenta	Decresce

<sup>a</sup> Existe um teor ótimo para vida de fadiga máxima

<sup>b</sup> Poucos estudos

(Fonte: Pinto, 1991)

As leis de fadiga, consideradas como sendo a relação entre o estado de tensão-deformação e o número de ciclos até atingir a ruptura, são empregadas através de experimentos laboratoriais com cargas repetidas que são conduzidas a diferentes níveis de tensão ou de deformação e objetivam reproduzir as condições das misturas asfálticas nas camadas dos pavimentos em campo (FONTES, 2009).

A vida de fadiga de uma mistura asfáltica é definida em termos de vida de fratura ou vida de serviço. A primeira se refere ao número total de aplicações de certa carga necessária para ocorrer à fratura completa da amostra. Já a vida de serviço se refere ao número total de aplicações dessa mesma carga que reduza o desempenho ou a rigidez da amostra a um nível preestabelecido (BERNUCCI et al., 2008).

Segundo Pinto e Motta (1995), a estimativa da vida de fadiga pode ser realizada de duas formas: através de ensaios de placa ou pistas de simulação de tráfego, que buscam a melhor representação das condições reais do pavimento, ou através de ensaios laboratoriais, com corpos de prova que representam um modelo das condições de trabalho.



Como descrito acima, para estimar a vida de fadiga de misturas asfálticas, são realizados procedimentos laboratoriais simulando as condições de solicitação de uma rodovia e ensaios que procuram uma aproximação fundamentada. Aproximação fundamentada é uma forma utilizada para facilitar a reprodução do estado de tensões real que ocorre no pavimento através de estados de tensões induzidos no corpo de prova, por carregamento, não necessariamente igual aos aplicados aos pavimentos.

No grupo de ensaios que procuram simular as condições do tráfego, pode - se citar aqueles que são executados em placas ou vigas apoiadas em suporte que pretendem representar as camadas adjacentes do revestimento asfáltico. No grupo dos ensaios laboratoriais, estão os experimentos que são executados em corpos de prova cilíndricos ou prismáticos, submetidos a níveis de tensões ou deformações de modo a simular a condição de solicitação do pavimento em campo (SANTOS, 2005).

Conforme exposto por Preussler (1983), os ensaios de carregamento repetido são diferenciados dos estáticos pelo tipo de esforço empregado que pode ser de flexão, torção, tração direta e indireta e, também pela geometria das amostras que pode se apresentar na forma cilíndrica, retangular, vigota retangular ou trapezoidal. Também diferem quanto à forma do carregamento e aos estados de tensões produzidos na amostra.

Apesar dos pavimentos asfálticos serem solicitados de forma complexa, em laboratório os estudos de vida de fadiga são realizados por solicitações simples, em que os parâmetros de carga (forma, modo, duração, nível, velocidade média, distribuição geométrica e intervalo entre solicitações sucessivas) são constantes durante a execução do ensaio, pela facilidade de execução. A realização dos ensaios de fadiga por compressão diametral sob tensão controlada são os mais usuais no País, tanto pela simplicidade da moldagem dos corpos-de-prova no sistema de carregamento quanto pela utilização e operação mais simples do equipamento de carga repetida.

O ensaio de compressão diametral para fadiga de misturas asfálticas é um ensaio de tração indireta conduzido com cargas repetidas em vários corpos de prova cilíndricos da mesma mistura, moldados nas mesmas condições. São aplicadas cargas de compressão diametralmente ao corpo de prova. O corpo de prova é submetido a um estado biaxial de

tensões, sendo que seções verticais do corpo de prova ficam sujeitas a esforços de compressão e seções horizontais, por sua vez, a esforços de tração.

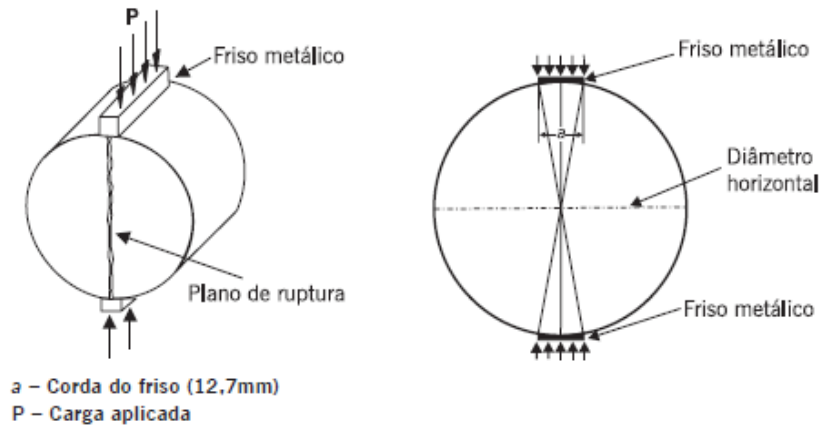


Figura 6: Esquema do ensaio de compressão diametral (BERNUCCI, et al., 2008)

Monismith et al. (1990); Balbo (2000) e Pinto (1991) *apud* Santos (2005) apontam as vantagens e desvantagens da utilização do ensaio de compressão diametral. Como vantagens pode-se destacar sua simplicidade de execução, a possibilidade de o equipamento poder ser utilizado para realização de outros ensaios, como módulo de resiliência e resistência à tração. Pode-se citar também que a ruptura é iniciada em uma região de tensões de tração relativamente uniforme e que existe um estado biaxial de tensões, que possivelmente representa melhor o estado de tensões em campo. Por fim, deve-se destacar que os ensaios podem ser realizados em corpos de prova confeccionados em laboratório ou extraídos do pavimento.

Como desvantagens cita-se que embora exista um estado de tensões biaxial no centro do corpo de prova, é impossível variar a proporção entre as componentes vertical e horizontal e, conseqüentemente, reproduzir o estado de tensões em locais críticos dentro do pavimento. O método subestima significativamente a vida de fadiga caso a tensão de tração principal for usada como determinante.

Quanto a utilização da cal hidratada objetivando melhorar as condições em relação à fadiga, Núñez et al., 2007, relatam que a cal hidratada reduz o trincamento de misturas asfálticas resultantes, não apenas do envelhecimento, mas também decorrente da fadiga e das baixas temperaturas. Embora, normalmente as misturas asfálticas mais rígidas apresentem maior

trincamento, a adição de cal melhora as características de fadiga das misturas e reduz o trincamento das mesmas.

O trincamento frequentemente ocorre devido à formação de microfissuras. Essas microfissuras são interceptadas e têm sua direção desviada pelas pequenas partículas de cal hidratada. A cal reduz o trincamento mais do que os fíleres inativos porque as reações entre a cal e as moléculas polarizadas do cimento asfáltico aumentam o volume efetivo das partículas de cal, rodeando-as com grandes cadeias orgânicas (LESUEUR E LITTLE, 1999). Desta maneira, as partículas de cal conseguem, mais eficientemente, interceptar e desviar as microfissuras, evitando que as mesmas se agrupem em grandes trincas, que causem a ruptura do pavimento.

### 2.1.3 Deformações Permanentes

Conforme citado anteriormente, a deformação permanente é considerada um dos principais defeitos ocorrem nas estruturas dos pavimentos asfálticos, comprometendo seu desempenho, afetando o conforto dos usuários e aumentando os custos operacionais.

A norma DNIT 005/2003-TER, que define os termos técnicos empregados para defeitos que nos pavimentos flexíveis, classifica o afundamento como sendo a deformação permanente caracterizada por depressão da superfície do pavimento, acompanhada ou não de solevamento, podendo se apresentar sob a forma de afundamento plástico ou de consolidação.

O afundamento plástico é causado pela fluência plástica de uma ou mais camadas do pavimento ou do subleito, acompanhado de solevamento. Quando ocorre em extensão de até 6m é denominado afundamento plástico local; quando a extensão for superior a 6m e estiver localizado ao longo da trilha de roda é denominado afundamento plástico da trilha de roda.

Já o afundamento de consolidação é causado pela consolidação diferencial de uma ou mais camadas do pavimento ou subleito sem estar acompanhado de solevamento. Quando ocorre em extensão de até 6m é denominado afundamento de consolidação local; quando a extensão for superior a 6m e estiver localizado ao longo da trilha de roda é denominado afundamento de consolidação da trilha de roda.

Segundo a Norma DNIT 005/2003-TER, a deformação permanente é classificada considerando a sua ocorrência, seja nas camadas de revestimento ou nas camadas do

pavimento ou subleito, como mencionado anteriormente. Quando o defeito ocorre nas camadas asfálticas, o defeito pode ser denominado ainda como ondulação ou corrugação. Nas camadas não asfálticas abaixo do revestimento podem apresentar deformações permanentes por densificação adicional pelo tráfego e por ruptura ao cisalhamento.

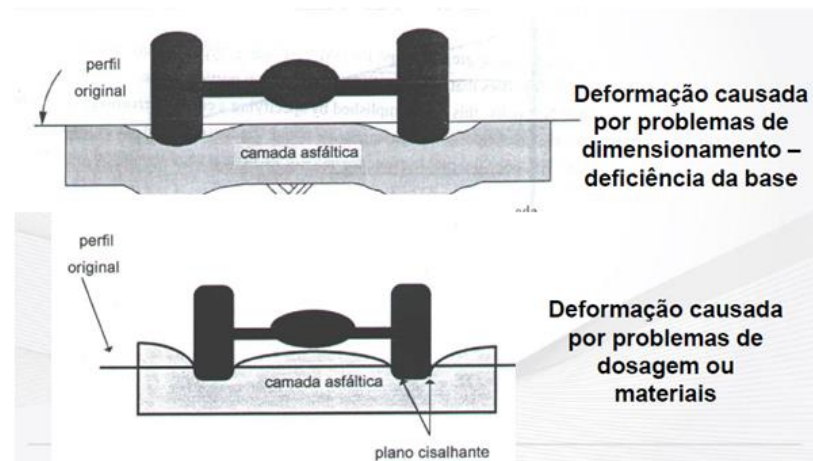


Figura 7: Representação do afundamento ou deformação permanente (adaptado FHWA, 1994)

A deformação permanente em trilha de roda, que ocorre pela deficiência de dosagem da mistura asfáltica ou dos materiais utilizados para elaboração da mesma, segundo Jolivet & Malot (2000), é resultante simultaneamente da deformação viscosa do ligante asfáltico e da deformação plástica da estrutura mineral da mistura asfáltica ou da consolidação desta estrutura. Estes autores comentam que tanto o ligante como os agregados exercem papel fundamental no desempenho da estrutura asfáltica. O ligante pela sua consistência e características reológicas, e o agregado com as forças de fricção interna entre suas partículas e ainda a própria resistência do grão (MOURA, 2010).

Pode-se destacar como sendo os principais fatores que contribuem para a formação de afundamentos em trilha:

- Teor de ligante asfáltico acima do teor de projeto;
- Emprego de ligante asfáltico com consistência inadequada com a região onde a mistura asfáltica foi empregada;
- Distribuição granulométrica inadequada e,

- Excesso de carga, comum nas rodovias do País.

Tabela 3: Fatores que afetam a deformação permanente de misturas asfálticas (adaptado de Souza et al., 1991)

PARÂMETRO	FATOR	MUDANÇA DO FATOR	EFEITO NA RESISTÊNCIA À DEFORMAÇÃO PERMANENTE
Agregado	textura superficial	lisa para rugosa	aumenta
	granulometria	descontínua ( <i>gap</i> ) para contínua	aumenta
	forma	redonda para angular	aumenta
	tamanho	aumento do tamanho máximo	aumenta
Asfalto	rigidez	aumento	aumenta
Mistura	teor de asfalto	aumento	diminui
	volume de vazios <sup>(1)</sup>	aumento	diminui
Condições locais	temperatura	aumento	diminui
	estado de tensão/deformação	aumento da pressão de contato	diminui
	repetição de cargas	aumento	diminui

<sup>(1)</sup> quando o volume de vazios for inferior a 3%, o potencial de deformação permanente das misturas aumenta.

Quanto à utilização da cal hidratada objetivando melhorar a resistência à deformação permanente, resultados de ensaios de *Creep* Dinâmico apresentados por Núñez (2009) demonstraram o aumento da resistência à deformação permanente da mistura asfáltica quando ocorre a incorporação de cal hidratada, tornando-a menos deformável. Misturas asfálticas convencionais (sem cal) acumularam deformações permanentes em torno de 21% maiores às registradas em misturas asfálticas com cal hidratada (BOCK, 2012). A figura 8, mostra de forma clara a influência da adição da cal nas misturas asfálticas, no que se refere a deformação permanente.

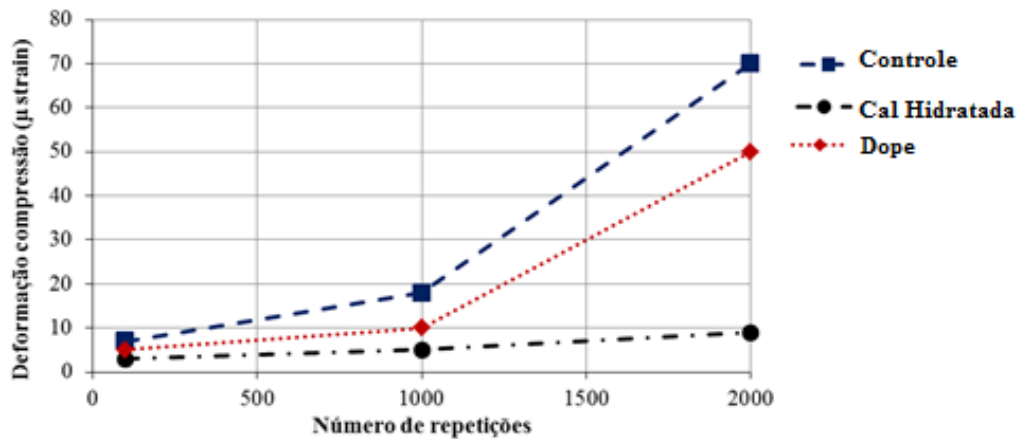


Figura 8: Efeito de aditivos na deformação permanente (Adaptado de KIM et al., 1995)

#### 2.1.4 Perda de Adesividade entre o Agregado e o Ligante Asfáltico

A perda de adesão/coesão (ou adesividade) entre os componentes da mistura pode ser considerada mais uma forma de deterioração do pavimento, o que acaba por reduzir o índice de serventia da rodovia, acelerando os processos de degradação estrutural do mesmo. A adesividade entre o ligante asfáltico e o agregado é uma característica importante, pois o ligante asfáltico tem a função de "cimentar" a estrutura, mantendo os agregados sempre que possível nas mesmas posições, proporcionando estabilidade à mistura asfáltica (MOURA, 2001).

Ainda segundo Moura (2001) o ligante asfáltico deve envolver todos os agregados da mistura, mantendo-os em contato um com o outro, garantindo maior resistência a deformações e proporcionando estabilidade à mistura.

Em misturas asfálticas, a adesividade pode ser definida como integração entre o ligante asfáltico e a superfície do agregado, podendo ter influência de diversos fatores, com grau de importância e intensidades diferentes. Moura (2001) relata que o processo de perda de adesividade entre o ligante asfáltico e os agregados podem ocorrer durante o processo de usinagem da mistura asfáltica, devido a variação da temperatura, da quantidade de finos, no teor de ligante, etc., como também na compactação da mistura em pista, obtendo baixa

densidade ou mesmo, na execução realizada a temperatura abaixo da indicada, ou até devido a problemas de drenagem.

Specht et. al, (2005) mencionam dois mecanismos para que ocorra a perda de adesividade, que estão correlacionados e sua combinação acaba provocando o chamado dano causado pela umidade em misturas asfálticas.

- Perda de adesão: mecanismo relacionado com a ação da água na interface entre o ligante e o agregado e ao descolamento do filme asfáltico da superfície do agregado.
- Perda de coesão: mecanismo relacionado a redução da rigidez do cimento asfáltico e ao enfraquecimento das ligações entre o ligante e o agregado.

Hicks (1991) sintetizou como apresentado na tabela 4, os inúmeros fatores que interferem nas características de adesividade ou o dano induzido pela umidade.

Tabela 4: Características desejável de materiais na pavimentação em relação à adesividade. Fonte: Hicks, 1991 apud Bock, 2009

Fator	Característica Desejável
1. Agregados a) textura superficial b) porosidade c) mineralogia d) cobertura do agregado por pó e) umidade superficial f) composição química superficial g) filler mineral	áspero depende do tamanho do poro agregados básicos são mais resistentes limpo seco capaz de formar pontes de hidrogênio aumenta a viscosidade do ligante
2. Cimento Asfáltico a) viscosidade b) química c) espessura filme	alta nitrogênio e fenóis alta
3. Tipo de Mistura a) vazios b) granulometria c) teor de ligante	muito baixo ou muito alto muito aberta ou muito densa alto
4. Condições Climáticas a) temperatura b) precipitações durante construção c) precipitações após construção d) ciclos de gelo/degelo	quente nenhuma mínima mínimo
5. Tráfego a) volume de tráfego	baixo tráfego

Vinha (1975) *apud* Moura (2001) cita os seguintes fatores como sendo prejudiciais a uma boa adesão ligante asfáltico e agregado: presença de água na interface, presença de pó na superfície do agregado, tipo de agregado, tipo de ligante asfáltico e, condições sob as quais a adesão é efetuada, tais como: viscosidade do ligante, tempo de mistura, temperatura, etc.

Vinha (1975) *apud* Moura (2001) destaca ainda que a grande variação das propriedades físico-químicas dos diversos tipos de ligantes asfálticos existentes e a composição dos agregados com suas superfícies altamente irregulares torna a adesão de um filme asfáltico sobre as superfícies dos agregados um fenômeno altamente complexo.

Quanto à ação da cal no que se refere à adesividade, estudos mostram que a incorporação de cal hidratada em misturas asfálticas, além de melhorar a adesividade entre o agregado e o ligante, promovem o enrijecimento da mistura, tornando-as mais resistente às deformações permanentes, retardando o trincamento, alterando favoravelmente a cinética da oxidação e interagindo com produtos da oxidação, reduzindo seus efeitos deletérios.



A cal hidratada tem sido utilizada em locais onde os agregados apresentam problemas de adesividade, como por exemplo, agregados de origem granítica, que são particularmente susceptíveis à perda de adesividade. A perda de adesividade ocorre quando a ligação entre cimento asfáltico e agregado se quebra, devido à presença de umidade, e o ligante se separa do agregado. Além do fenômeno químico, as características ambientais (calor e chuvas intensas) e o tráfego têm papel importante na perda de adesividade (LITTLE et al. 2006 apud NÚÑEZ et al, 2007).

### 2.1.5 Propriedades dos Agregados e dos Ligantes Asfálticos

Nos revestimentos das principais rodovias do Brasil, são usadas misturas asfálticas do tipo Concreto Asfáltico (CA), constituídas de Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP), agregados graúdos, agregados miúdos e fíler. Por possuírem propriedades distintas entre si, é fundamental a caracterização desses constituintes. Sabe-se que a microestrutura formada por esses materiais desempenha importante papel na resistência do pavimento com relação à deformação permanente, trincamento por fadiga e trincamento térmico (MONISMITH, 1991; VINSON et al., 1999; BERNUCCI et al., 2007). Por possuírem papel fundamental na estabilidade e na capacidade de suporte de carga dos pavimentos, os agregados graúdos devem ser caracterizados quanto a propriedades de forma, como lamelaridade, angularidade e índice de forma.

Segundo a norma ABNT NBR 12891/93 de dosagem de misturas betuminosas pelo método Marshall, o termo agregado é utilizado para todo material inerte e granular que faz parte da mistura betuminosa.

As propriedades dos agregados utilizados nas misturas asfálticas preparadas a quente são muito importantes para o desempenho adequado do pavimento, já que defeitos como degradação e deformação permanente estão diretamente relacionados à escolha inadequada dos mesmos.

O agregado escolhido para uma determinada utilização deve apresentar propriedades que suportem as tensões impostas na superfície e no interior do pavimento. O desempenho dos agregados depende da maneira como são produzidos e das condições sob as quais vão atuar. A escolha é feita em laboratório onde uma série de ensaios é utilizada para prever o seu comportamento posterior quando em serviço, (BERNUCCI et al., 2008).

Bernucci et al. (2008) dizem ainda que as propriedades geológicas do agregado estão diretamente ligadas ao seu desempenho. Dentre as principais propriedades estão: composição mineralógica, tipo de rocha, composição química, granulação, tendência à degradação, abrasão ou fratura sob tráfego e o potencial de adesão do ligante asfáltico em sua superfície.

A seleção de agregados para utilização em revestimentos asfálticos depende de fatores como disponibilidade, custo e qualidade. Também deve ser considerada a finalidade de aplicação. Segundo Roberts et al. (1996), são as propriedades físicas dos agregados que determinam principalmente a adequação para o uso em misturas asfálticas e em menor extensão as propriedades químicas. Propriedades físico-químicas tais como umidade, adesividade e, em consequência, descolamento da película de asfalto são função da composição e da estrutura dos minerais no agregado, entre outros fatores. As propriedades químicas dos agregados têm pequeno efeito no seu desempenho, exceto quando afetam a adesividade do ligante asfáltico ao agregado e a compatibilidade com aditivos antidescolamento que podem ser incorporados ao ligante asfáltico (BERNUCCI et al., 2006).

O nível de desempenho de um revestimento asfáltico está diretamente ligado ao entendimento de como seus constituintes reagem juntos. Existe uma elaborada série de fatores que atuam conjuntamente para produzir uma estrutura com desempenho adequado.

O ligante asfáltico pode ser considerado um material viscoelastoplástico e termosensível, ou seja, possuem uma parcela viscosa, elástica e plástica e é sensível à mudança de temperatura. Torna-se plástico quando submetido a altas temperaturas (acima de 100 °C) e quando recebe um carregamento, o material deforma e não volta ao estado original. O cimento asfáltico atua como um fluido viscoso e em baixas temperaturas (abaixo de 0 °C), se torna elástico, atuando como uma borracha. Quando solicitado por um carregamento, o material se deforma e quando aliviado retorna ao seu estado original.

Os ligantes asfálticos são fundamentais no comportamento das misturas asfálticas após a usinagem, devido sua estrutura termoplástica, sensíveis à variação de temperatura e umidade. Suas propriedades físicas são determinadas a partir de ensaios de penetração, ponto de amolecimento, suscetibilidade térmica, viscosidade e ductilidade.

Farjallat (1972) comenta que as características de aderência e adesividade de ligantes asfálticos relacionam-se com o estado de alteração do agregado. Consequentemente, é válido

afirmar que a resistência da estrutura está associada com a eficiência desta ligação. As superfícies silicatadas são desfavoráveis a uma boa adesão ligante/agregado, especialmente se os agregados estão úmidos no momento da usinagem.

Ainda segundo o autor, caso ocorra o desprendimento da película de ligante asfáltico em uma mistura asfáltica, isto acarretará na penetração de água e, caso o agregado apresente na sua superfície SiO<sub>4</sub>, poderá ocorrer reações de acidificação, tornando o agregado cada vez mais ácido, ou seja, no momento em que há penetração de água entre o ligante asfáltico e a superfície do agregado, poderá ocorrer o desprendimento da película de ligante asfáltico de forma progressiva.

A figura 9 representa a tentativa de quantificação do percentual de influência dos agregados e ligantes para cada uma das patologias mais comuns em pavimentos asfálticos.

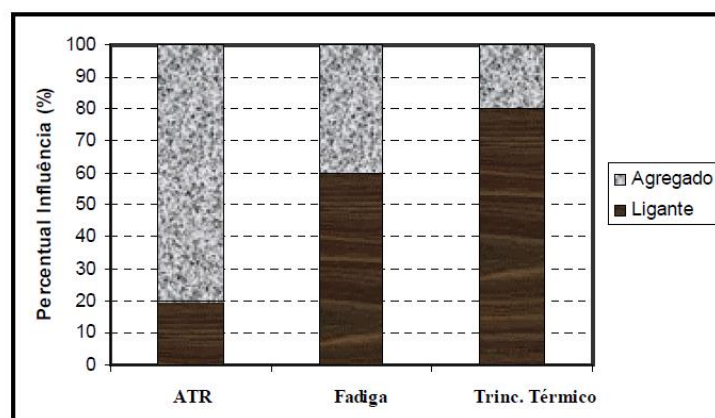


Figura 9: Influência do agregado e do ligante no desempenho do CBUQ (FHWA, 2002)

### 2.1.6 Propriedades das misturas asfálticas

A mistura asfáltica é uma combinação adequadamente processada entre o ligante asfáltico e agregados, com objetivo de satisfazer a certos requisitos esperados pelo revestimento, tais como: ser uma camada impermeável, flexível, estável, durável e, além disso, apresentar resistência à fadiga, resistência à derrapagem e ao trincamento térmico.

Muitos estudos estão sendo desenvolvidos objetivando determinar uma combinação de agregados e teor de ligante que resulte em uma estrutura resistente e durável dessas misturas.

O desempenho de uma mistura asfáltica está relacionado com a sua distribuição granulométrica e teor ideal de ligante asfáltico. A granulometria acomete quase todas as propriedades consideráveis de uma mistura asfáltica, como a estabilidade, a durabilidade, a permeabilidade, a trabalhabilidade, a resistência à fadiga, a resistência à deformação permanente e a resistência aos danos causados pela umidade.

O volume de vazios da mistura tem papel fundamental no bom desempenho na estrutura do pavimento. Misturas com elevado volume de vazios apresentam menores resistências à fadiga.

Volume de vazios em excesso na mistura asfáltica permite a permeabilidade da água e do ar bem como o aumento da suscetibilidade ao dano por umidade. A presença do ar acaba deixando a mistura asfáltica mais frágil. Já a presença de água provoca a perda de adesividade entre o ligante e agregado, principalmente quando submetidas à ação do tráfego, variações de carregamento e temperatura.

Como possuem ligantes na sua composição, as misturas asfálticas são caracterizadas pelo seu comportamento viscoelásticos e termossuscetível, o que as torna diretamente influenciáveis ao tempo de aplicação dos carregamentos combinados às variações de temperatura a que estão expostas. (RIVIÈRE, 1996; HUET, 1963).

Conhecer as propriedades fundamentais dos materiais utilizados para a elaboração das misturas asfálticas é de suma importância para que se possa assim, prever o seu comportamento quando submetido a um determinado tipo de solicitação. Como os ligantes asfálticos possuem comportamento viscoelástico, estes apresentam peculiaridades em cada caso, não se pode então ter as suas condições de análise generalizadas. Portanto prever seu comportamento e definir quantitativamente as características intrínsecas às suas propriedades mecânicas torna-se um desafio (HUET, 1963).

Portanto, devido à complexidade de se modelizar toda a diversidade de variáveis que rege o comportamento das misturas asfálticas, algumas propriedades são consideradas como hipóteses, isto é, assumidas como constantes, tais como as apresentadas por BARRA (2009):

- Linearidade: Para os casos práticos de dimensionamento, admite-se a hipótese da elasticidade linear para descrever o comportamento das misturas asfálticas, sendo

utilizada para o cálculo das tensões e deformações nas camadas betuminosas, no âmbito do método de dimensionamento.

- Homogeneidade: Embora a estrutura granular com tamanhos variados e, em alguns casos, de origens distintas, associada à presença de um ligante betuminoso com propriedades diferentes à dos granulares, atribua um caráter heterogêneo às misturas asfálticas utilizadas correntemente nos pavimentos, a hipótese de homogeneidade macroscópica pode ser considerada à escala de uma camada do pavimento, considerando a complexidade que seria considerar o comportamento heterogêneo das misturas asfálticas
- Isotropia: Nos cálculos de dimensionamento rodoviário é admitida a hipótese da isotropia das misturas asfálticas (HECK, 2001). Em laboratório, estão sendo encontrados resultados com uma variação de até 20% das medidas de módulo em corpos de prova cilíndricos submetidos a esforços de tração-compressão, oriundos de três eixos de amostragem em uma mesma mistura asfáltica (DOUBBANEH, 1995).

## 2.2 USO DA CAL HIDRATADA NA PAVIMENTAÇÃO ASFÁLTICA

A cal, também conhecida como hidróxido de cálcio é uma das substâncias mais importantes da indústria devido a sua ampla utilização em diversos setores. Não se sabe ao certo quando a cal foi descoberta. Talvez os antigos ocupantes da Terra tenham utilizado a pedra de calcário para proteger as fogueiras. O fogo aqueceu as rochas, criando a primeira cal calcinada. Depois, choveu e a cal extinguiu-se até se tornar hidróxido de cálcio, que, por sua vez, reagiu com as cinzas e areia ao redor da fogueira, criando a primeira argamassa da antiguidade. A existência de fundações de cal na Turquia oriental demonstra que ela já era utilizada há 14.000 anos. Os egípcios há 5.000 anos já utilizavam a cal na construção de suas pirâmides.

### 2.2.1 Definições e Classificação

A cal pode ser definida como um produto químico com diversas aplicações cuja propriedade mais importante é a carbonatação por reação com o anidrido carbônico presente no ar atmosférico, permitindo o seu emprego como aglomerante.

Cal virgem e cal hidratada são produtos de grande versatilidade, presentes de forma direta ou indireta em uma infinidade de aspectos da vida moderna, na cidade e no campo, proporcionando incontáveis benefícios ao homem desde a Antiguidade (ABPC, 2014).

Cal é o termo genérico aplicado frequentemente à cal calcítica, ao calcário e à cal hidratada, embora estes produtos sejam quimicamente diferentes, devido a processamentos e tratamentos e sobre ela pode - se fazer as seguintes afirmações:

- O calcário (carbonato de cálcio -  $\text{CaCO}_3$ ) existe em grandes quantidades em rochas naturais de todo o mundo
- A cal (óxido de cálcio -  $\text{CaO}$ ) é uma substância alcalina e o resultado da transformação química do calcário através do aquecimento do mesmo acima dos  $1.000\text{ }^\circ\text{C}$ , o que requer energia. Como reage rapidamente com água, o óxido de cálcio, também conhecido como cal calcinada, é muitas vezes chamado de cal virgem.
- Cal hidratada (hidróxido de cálcio -  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) é uma substância alcalina forte que se forma quando o óxido de cálcio reage com a água. Esta reação gera calor. Conforme a quantidade de água utilizada, o hidróxido de cálcio pode ser um hidrato seco (pó seco), uma pasta (pasta de cal) ou um leite de cal líquido, também conhecido por suspensão concentrada de cal (suspensão seca diluída em água).
- O carbonato de cálcio precipitado (PCC),  $\text{CaCO}_3$ , é um carbonato de cálcio sintético. Este carbonato, com as suas características morfológicas especiais, pode ser produzido industrialmente através da reação entre o hidróxido de cálcio e  $\text{CO}_2$ .

A Figura 10 demonstra o ciclo da cal, iniciando no processo de calcinação dos carbonatos presentes na matéria prima, sua hidratação a partir de reação espontânea com a água ou umidade do ar e por fim o processo de carbonatação.

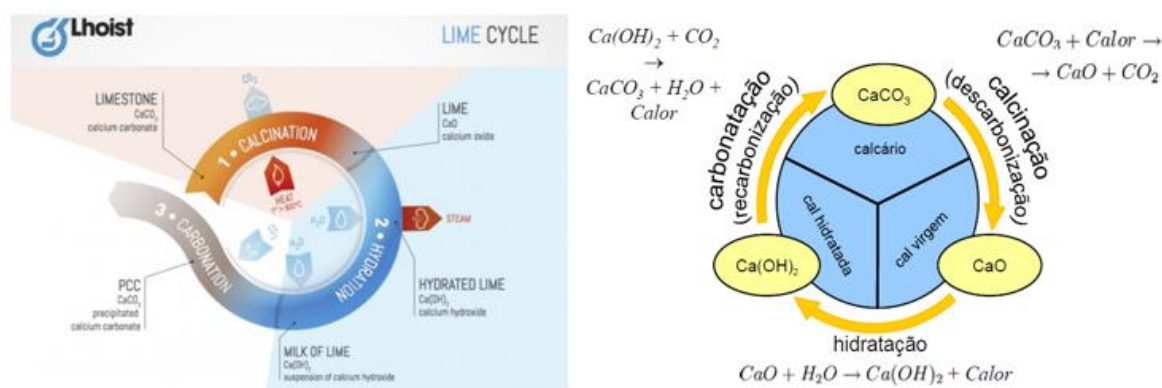


Figura 10: Representação do ciclo da cal (adaptado do site Belocal e IME)

Tabela 5: Elementos químicos presentes na cal

Tipos de CAL	VIRGEM		HIDRATADA	
	COMPOSTOS	FÓRMULA	COMPOSTOS	FÓRMULA
CÁLCICA	Óxido de cálcio	CaO	Hidróxido de cálcio	Ca(OH) <sub>2</sub>
	Carbonato de cálcio	CaCO <sub>3</sub>	Óxido de cálcio	CaO
			Carbonato de cálcio	CaCO <sub>3</sub>
DOLOMÍTICA OU MAGNESIANA	Óxido de cálcio	CaO	Hidróxido de cálcio	Ca(OH) <sub>2</sub>
	Óxido de magnésio	MgO	Óxido de cálcio	CaO
	Carbonato de cálcio	CaCO <sub>3</sub>	Hid. de magésio	Mg(OH) <sup>2</sup>
	Carbonato de cálcio e magnésio	(Ca,Mg). (CO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	Óxido de magnésio	MgO
			Carbonato de cálcio	CaCO <sub>3</sub>
			Carbonato de cálcio e magnésio	(Ca,Mg). (CO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>

(Fonte: <http://www.tecomat.com.br>)

A cal é um aglomerante aéreo, ou seja, é um produto que reage em contato com o ar. Nesta reação, os componentes da cal se transformam em um material tão rígido quanto a rocha original (o calcário) utilizada para fabricar o produto. A cal pode ser considerada o produto manufaturado mais antigo da humanidade. Há registros do uso deste produto que datam de antes de Cristo. Um exemplo disto é a muralha da China, onde se pode encontrar, em alguns trechos da obra, uma mistura bem compactada de terra argilosa e cal.

Pela diversidade de aplicações, a cal está entre os dez produtos de origem mineral de maior consumo no planeta. Sua utilização engloba as indústrias siderúrgicas, para remoção de impurezas; o setor ambiental, no tratamento de resíduos industriais; as indústrias de papel e o setor de construção civil.

Segundo Guimarães (2002), a cal compreende seis produtos resultantes da calcinação de calcários, calcários magnesianos, dolomitos hidratados ou não. Estes produtos são: cal virgem cálcica, cal hidratada cálcica, cal virgem dolomítica, cal dolomítica hidratada normal tipo N, cal dolomítica hidratada tipo especial S, os tipos intermediários das cales cálcicas e dolomíticas (magnesianas) e a cal hidráulica.

A maioria das cales produzidas no Brasil resultam da calcinação de calcários/dolomitos metamórficos, de idades geológicas diferentes. As provenientes de calcários sedimentares e de conchais naturais recentes participam de maneira subordinada na produção (ABPC, 1990).

Na construção civil, a cal é utilizada principalmente na forma hidratada e é mais conhecida e estudada pela propriedade aglomerante. O aglomerante é o hidróxido, e a capacidade aglomerante da cal hidratada é quantificada pelo teor dos óxidos/hidróxidos presentes no produto.

Os carbonatos residuais constituem-se na fração inerte da cal. A cal hidratada endurece em contato com o ar por recarbonatação dos óxidos, ao absorver CO<sub>2</sub> (gás carbônico) do ar.

Conforme definição encontrada na NBR 6453, a cal virgem é um produto obtido da calcinação de calcários e dolomitos (matéria prima), do qual o constituinte principal é o óxido de cálcio ou o óxido de cálcio em associação natural com o óxido de magnésio, capaz de extinção em água.

Já a cal hidratada é definida na Norma NBR 7175 como sendo um pó seco obtido da hidratação da cal virgem, constituída essencialmente de hidróxido de cálcio e hidróxido de magnésio, ou ainda de uma mistura entre estes componentes.

Ainda de acordo com a ABNT NBR 7175 a cal hidratada pode ser classificada em três tipos: CH I, CH II e CH III e quanto à concentração de Cálcio e Magnésio. Todos os tipos têm que ser submetidos aos mesmos ensaios, mas as exigências de resultados melhores para a cal CH I são maiores do que para a CH II, que exigem mais do que para a CH III.



A Cal é definida como sendo do Tipo CH I, quando é constituída essencialmente de hidróxido de cálcio ou de uma mistura de hidróxido de cálcio e hidróxido de magnésio, com teor de gás carbônico igual ou menor que 5%.

Já a Cal é definida como sendo do Tipo CH II, quando constituída essencialmente de uma mistura de hidróxido de cálcio, hidróxido de magnésio, e óxido de magnésio, com teor de gás carbônico igual ou menor que 5%, sem limites para os teores de óxidos não hidratados.

E por fim, a Cal do tipo CH III, quando constituída essencialmente de uma mistura de hidróxido de cálcio, hidróxido de magnésio e óxido de magnésio, com teor de gás carbônico igual ou menor que 13%.

As tabelas abaixo apresentadas reproduzem os limites para os índices químicos e físicos da cal hidratada, de acordo com a Norma NBR 7175 - Cal hidratada para argamassas.

Tabela 6: Concentração de Cálcio e Magnésio dos cales

TIPO	Cálcio e Magnésio
Cálcica ou Calcítica	% CaO > 90 %
Magnesiana	65% < %CaO < 90%
Dolomítica	% CaO < 65%

Fonte: (ABNT NBR7175)

Tabela 7: Características Químicas das cales

Parâmetros de Qualidade		CH-I	CH-II	CH-III
Anidrido Carbônico (CO <sub>2</sub> )	Fábrica	< 5,0%	< 5,0%	<13,0%
	Depósito ou obra	< 7,0%	< 7,0%	<15,0%
Óxidos Totais na base não volátil (CaO t1 +MgO t)		> 90,0%	> 88,0%	> 88,0%
Óxidos Totais não Hidratados		< 10,0%	< 15,0%	< 15,0%

Fonte: (ABNT NBR7175)

Tabela 8: Características Físicas das cales

Parâmetros de Qualidade		CH-I	CH-II	CH-III
Finura (% retida acumulada)	Peneira 0,60 mm (#30)	< 5,0%	< 5,0%	<15,0%
	Peneira 0,075 mm (#200)	< 10,0%	< 15,0%	<15,0%
Retenção de Água		> 75,0%	> 70,0%	> 70,0%
Incorporação de Areia		> 3,0%	> 2,2%	> 2,2%
Estabilidade		Ausência de cavidades ou protuberâncias		
Plasticidade		> 110,0%	> 110,0%	> 110,0%

Fonte: (ABNT NBR7175)

### 2.2.2 Aplicações Gerais

São múltiplas as aplicações da cal, tais como a construção civil, indústria química, tratamento de resíduos sólidos, tratamento de águas para abastecimento público, tratamento de águas residuais, fabricação de açúcar, atividades mineiras, fabricação de papel, produção de soda caustica, produção de aço, agricultura. As suas propriedades permitem-lhe exercer funções de neutralização, floculação, caustificação, aglutinação, lubrificação e de absorção, entre outras. A cal viva e a cal hidratada são constantemente objeto de estudo e investigação para múltiplas e novas aplicações.

Segundo a ABPC (2014), a cal virgem e a cal hidratada são produtos de grande versatilidade, presentes de forma direta ou indireta em uma infinidade de aspectos da vida moderna, na cidade e no campo, proporcionando incontáveis benefícios ao homem desde a Antiguidade e suas principais aplicações podem ser descritas a seguir:

- Na construção civil, a cal é utilizada principalmente na forma hidratada, como componente fundamental no preparo de argamassas de assentamento e de revestimento de grande durabilidade e ótimo desempenho. É utilizada também no preparo de tintas alcalinas de alta alvura, atribuindo à pintura propriedades fungicidas e bactericidas que favorecem a saúde e o conforto dos usuários das edificações.
- Nas indústrias siderúrgica e metalúrgica, a cal virgem industrial é fundamental em diversas fases da fabricação do aço, do alumínio e de outros metais não ferrosos, como

cobre, ouro, níquel e zinco. Na siderurgia, a cal é empregada como aglomerante na pelotização do minério de ferro e no processo de sinterização, na dessulfuração de gusa, como elemento escorificante, protetor de revestimentos refratários em fornos de aciaria e como lubrificante na trefilaria. A metalurgia de alumínio emprega a cal na causticação ou recuperação da soda cáustica usada na digestão da bauxita.

- Em processos químicos e industriais, a cal tem importante presença em vários setores. Na indústria química, é insumo básico na produção de especialidades como carbonato de cálcio precipitado, carbureto de cálcio, óxido de propeno, cloreto de cálcio, hipoclorito de cálcio e vários outros elementos. Na produção de papel e celulose, a cal virgem é fundamental na causticação do licor negro e como agente redutor de acidez na produção de papéis alcalinos. É também empregada como fundente em vidrarias e em outros processos industriais, como a produção de refratários, de borracha, de pigmentos e em curtumes.
- Na indústria alimentícia, a cal está presente nos setores sucro-alcooleiro, cítrico e em vários processos de preparo de alimentos. Na produção de açúcar e de álcool, age como redutor de acidez e clarificador do caldo da cana. No setor cítrico, é agente redutor de acidez e auxiliar para secagem do bagaço de cítricos e fonte de cálcio na produção das rações preparadas à base do farelo desse bagaço. É empregada também na produção de fosfato bicálcico para alimentação animal e usada ainda como redutor de acidez na indústria de laticínios e em outros processos.
- Na agricultura, a cal tem forte aplicação na recuperação de solos ácidos, tornando-os próprios ao reflorestamento e a diversas culturas, sendo também um importante micronutriente. É fonte de cálcio na produção industrial de fertilizantes agrícolas. Tem ainda inúmeras aplicações no meio rural, incluindo a proteção de áreas de criação de frangos, a alcalinização de lagoas para piscicultura e até mesmo interessantes usos na culinária.
- Na saúde e na preservação ambiental, a cal age como poderoso bactericida e saneador de ambientes, tendo papel destacado na prevenção de males como a doença de Chagas e no combate a vetores como o da cólera. É elemento básico no tratamento de efluentes domésticos e industriais e de água para abastecimento público. É um valioso

agente dessulfurante no controle de emissões atmosféricas da indústria, contribuindo para reduzir a incidência de chuvas ácidas.

### 2.2.3 Efeitos da Incorporação de cal hidratada nas misturas asfálticas

Está cientificamente comprovado que a cal hidratada tem efeitos benéficos sobre as misturas asfálticas utilizadas na construção de estradas. Sua aplicação foi estudada em profundidade nos EUA, onde a cal hidratada está presente em 10% das misturas asfálticas a quente, produzidas a cada ano. Já na Europa, as funcionalidades de cal hidratada são ainda pouco conhecidas e, portanto, o uso de cal hidratada é menos comum.

Estudos publicados nos EUA têm demonstrado que a incorporação de cal hidratada em misturas asfálticas, além de melhorar a adesividade agregado-ligante, aumenta a rigidez da mistura, sem prejuízo da vida de fadiga. Também interage com produtos de oxidação, reduzindo seus efeitos deletérios (LITTLE et al., 2006).

Publicações de Little et al., (2006) comprovam que a incorporação de cal em misturas asfálticas, mais do que só melhorar a adesividade agregado-ligante como já mencionado, promove o enrijecimento do ligante asfáltico e da própria mistura, deixando - a mais resistente às deformações permanentes e protelando o trincamento que pode ocorrer tanto por fadiga quanto por baixas temperaturas.

Entretanto, estas melhorias dependem significativamente do tipo e da qualidade da cal utilizada. Cales com baixos teores de óxido (CaO) e hidróxido de cálcio (Ca(OH)<sub>2</sub>) não produzirão os mesmos efeitos benéficos do que cales com elevados teores destes componentes. Pretende-se, portanto nesta pesquisa analisar detalhadamente a influência do tipo de cal nos parâmetros de dosagem e no comportamento mecânico de misturas de CA.

A cal hidratada pode ser considerada um eficiente agente melhorador de adesividade, sendo largamente especificada em locais onde os agregados apresentam problemas de adesividade. A perda de adesividade ocorre quando a ligação entre cimento asfáltico e agregado se quebra, devido à presença de umidade, e o ligante se separa do agregado. Alguns agregados, como os de granito, são particularmente susceptíveis à perda de adesividade. Além do fenômeno químico, as características ambientais (calor e chuvas intensas) e o tráfego têm papel importante na perda de adesividade.

A capacidade da cal hidratada de tornar uma mistura asfáltica mais rígida e resistente às deformações permanentes é um reflexo de seu desempenho superior como fíler mineral ativo. De forma diferente a muitos outros fíleres, a cal é quimicamente ativa. Reage com o ligante, removendo componentes indesejáveis ao mesmo tempo em que suas pequenas partículas se dispersam na mistura asfáltica, tornando-a mais resistente às deformações permanentes e à fadiga.

O enrijecimento resultante da adição de cal hidratada melhora o desempenho dos ligantes a temperaturas elevadas, sem tornar a mistura asfáltica mais frágil a temperaturas muito baixas. De fato, a baixas temperaturas, a cal hidratada se torna menos ativa quimicamente e se comporta como qualquer outro fíler inerte.

A incorporação de cal hidratada nas misturas asfálticas possibilita, portanto, a melhora no desempenho de diversos fatores, que pode - se resumir a seguir:

- Atua como um fíler mineral enrijecendo o ligante asfáltico e a própria mistura;
- Melhora a resistência reduzindo o trincamento a baixas temperaturas;
- Altera a cinética de oxidação favoravelmente e interage com os produtos de oxidação para reduzir seus efeitos deletérios; e
- Altera as propriedades plásticas melhorando a sensibilidade à umidade e durabilidade.

O efeito de preenchimento da cal reduz o potencial da mistura asfáltica de se deformar a temperaturas elevadas, especialmente durante o início da sua vida útil, período em que está mais suscetível a deformações permanentes. Além disso, a cal torna a mistura asfáltica menos sensíveis aos efeitos da umidade através da melhoria da ligação entre o agregado e o ligante.

Quanto ao envelhecimento da mistura asfáltica devido à oxidação, a cal hidratada reduz não só a velocidade de oxidação, mas também o dano criado pelos produtos da oxidação.

Conforme Little (2001), além desses benefícios já mencionados, a adição de cal nos agregados com finos plásticos melhora a agregação destes através dos mecanismos de troca catiônica, flocculação/aglomeração e reações pozolânicas. Este processo torna os agregados finos menos suscetíveis à umidade reduzindo sua capacidade de atrair e armazenar água.

Conforme estudos realizados por Núñez et al. (2007), a adição de cal hidratada produz misturas asfálticas a quente com maior módulo de resiliência (mais resistentes a deformações permanentes), contudo estas melhorias das propriedades mecânicas dependem significativamente da qualidade da cal empregada. Cales com baixos teores de  $\text{Ca(OH)}_2$  não produzirão tais efeitos benéficos sendo considerado suficiente para otimizar a mistura asfáltica em termos de módulo de resiliência, resistência à tração e adesividade um teor de  $\text{Ca(OH)}_2$  da ordem de 90%.

A Tabela 9 resume alguns resultados obtidos com a adição da cal hidratada nas misturas asfálticas, no que se refere a diversas propriedades.

Tabela 9: Influência da incorporação de cal hidratada em misturas de concreto asfáltico (CA)

<i>Propriedade</i>	<i>Efeito</i>	<i>Fonte</i>
<i>Durabilidade</i>	↑ 2 a 10 anos (20 a 50%)	EULA, 2010
<i>Resistência ao envelhecimento</i>	Redução da taxa de oxidação e envelhecimento em alguns ligantes asfálticos.	PETERSEN <i>et al.</i> , 1987 SEBAALY, 2006
<i>Dano por umidade induzida</i>	Menor suscetibilidade aos danos por umidade com efeitos mais pronunciados em misturas submetidas a múltiplos ciclos C-D.	HICKS, 1991 LITTLE e EPPS, 2001 MC CANN, 2003 LUTIF <i>et al.</i> , 2007
<i>Resistência à Tração (RT)</i>	Em 113 misturas analisadas apenas 63 apresentaram aumento de RT (56%) (sem descrição do tipo de cal empregado).	EULA, 2010
	Misturas com cal hidratada apresentam melhor manutenção de RT após o processo de condicionamento.	PICKERING, 1992
	Um teor de Ca (OH) <sub>2</sub> da ordem de 90% é necessário para otimizar a mistura asfáltica em termos de RT, MR e adesividade.	NÚÑEZ, 2007
<i>Módulo de Resiliência (MR)</i>	Aumentos de MR em função do enrijecimento provocado pela cal nas misturas.	PICKERING, 1992
	Aumentos mais pronunciadas com cales que apresentam teores de óxidos ou hidróxidos de cálcio mais elevados.	NÚÑEZ, 2007

(Fonte: Bock, 2012)

#### 2.2.4 Formas de Incorporação da Cal nas Misturas Asfálticas

Existem diversas maneiras de se adicionar cal hidratada nas misturas asfálticas. Geralmente, pode-se encontrar na literatura experiências com maior frequência, utilizando a cal das seguintes formas:

- Cal/Fíler: mistura de cal ao agregado graúdo seco
- Cal/Agregado Seco: mistura de cal ao agregado graúdo seco
- Cal/Agregado Úmido: mistura de cal
- Cal/Calda (Lama de Cal): sob a forma de calda no agregado graúdo.
- Lama de Calda Marinado: Processo em que uma calda de cal fica agindo no agregado por um período que pode variar de 24 a 48 horas

A maioria dos métodos que incorporam cal hidratada nas misturas asfálticas, considera a cal como um material de preenchimento mineral. Como consequência, o teor do material de preenchimento é reduzido na mesma quantidade que a cal hidratada é adicionada, de modo que o conteúdo total de material de enchimento é mantido constante.

O teor de cal hidratada adicionada varia normalmente entre 1 – 2.5% de peso seco, conforme tabela 10, que apresenta também os diferentes métodos de incorporação da cal nos Estados Unidos e na Europa.



Tabela 10: Formas de incorporação de Cal na Mistura Asfáltica  
(adaptada de Report to the European Lime Association, 2010)

País/Estado	% de Cal Hidratada adicionada	Formas de Incorporação da Cal Hidratada					
		Cal Hidratada Pura	Misturado como material de enchimento	Cal hidratada seca adicionada ao agregado seco	Cal hidratada seca adicionada ao agregado úmido	Lama de Cal adicionada ao agregado	Marinado
Europa							
Áustria	1.5-3.5	X					
França	1-1.5	X	X				
Holanda	2		X				
Suíça	1.5	X					
Reino Unido	1-2	X					
USA							
Arizona	1				X		
Califórnia	0.7-1.2					X	Obrigatório
Colorado	1				X	X	Opcional
Flórida		X				X	
Geórgia	1	X		X			
Mississippi	1				X		
Montana	1.4	X					
Nevada	1-2.5				X		Obrigatório
Novo México					X		
Oregon	1				X		Opcional
Carolina do Sul	1				X		
Dakota do Sul					X		
Texas	1-1.5	X			X	X	
Utah	1-1.5					X	Opcional
Wyoming	1-1.5				X		

Conforme Relatório elaborado pela Associação Europeia da cal (2010), nos Estados Unidos a forma mais comum de se adicionar a cal hidratada na mistura asfáltica consiste em adicionar a cal na forma seca diretamente no agregado graúdo seco, necessitando-se assim de um silo específico para este material.

Alguns Estados dos EUA preferem trabalhar com a forma de incorporação denominada de marinação, que consiste em deixar a cal hidratada agindo diretamente no agregado por um período que pode variar de 24 a 48 horas. O objetivo deste processo de marinação é permitir um melhor tratamento da cal nos agregados. O período de marinação não deve se estender muito devido ao risco de recarbonatação da cal hidratada.

Experiência enunciada por Bock (2012) relata que para melhorias no quesito adesividade, melhores resultados são obtidos quando a cal é adicionada sobre o agregado graúdo, devido sua interação e modificação da superfície do agregado, promovendo características mais favoráveis para a adesão do ligante asfáltico.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

No capítulo a seguir, é feita a descrição da metodologia empregada na pesquisa, bem como a caracterização de todos os materiais empregados neste trabalho, além de um resumo do procedimento experimental.

#### 3.1 MATERIAIS

Para o atendimento do objetivo principal desta pesquisa foi realizada a caracterização dos materiais utilizados no trabalho, sendo eles os agregados pétreos, os ligantes asfálticos e as cales. A avaliação das características foi realizada seguindo os procedimentos constantes nas normas vigentes. Todos os ensaios foram realizados no Laboratório de Pavimentação (LPAV) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS).

##### 3.1.1 Agregados Pétreos

Os agregados minerais utilizados no presente estudo são provenientes de uma pedreira de rocha de origem granítica, localizada na cidade de Camaquã – Rio Grande do Sul, chamada de Pedreira Capitão Jango II, conforme Figura 11. Na Figura 12, constam os três materiais rochosos utilizados: Brita 3/4", Brita 3/8" e Pó-de-pedra.



Figura 11: Pedreira Capitão Jango II – Camaquã/RS



Figura 12: Brita 3/4", Brita 3/8" e Pó-de-pedra

A coleta do material foi realizada em uma única ocasião, das pilhas de estocagem, portanto houve necessidade de quarteamento do volume total. Após a coleta, o agregado foi lavado e secado, separado e manipulado a fim de ser enquadrado na curva de distribuição granulométrica representada pelo centro da faixa C do DNIT. Foram também executados os ensaios de caracterização deste agregado

A caracterização dos agregados é apresentada a seguir, na tabela 11 indicando os valores encontrados para os ensaios, bem como as normas utilizadas para os seus procedimentos.

Para a realização do ensaio de granulometria foram utilizadas as seguintes peneiras: 3/4", 1/2", 3/8", n. 4, n. 10, n. 40, n. 80, e n. 200, as quais são apontadas na Norma 031/2006, que especifica a faixa C. Os resultados da granulometria, obtidos através da média de duas determinações, são apresentados na tabela 12. Na Figura 13 encontram-se as curvas granulométricas. São apresentadas ainda, a composição e a curva granulométrica das duas cales utilizadas na pesquisa.

Após os procedimentos acima especificados, foram separadas as quantidades de agregados necessários para a confecção dos corpos de provas de 1.250 gramas e acondicionados em sacos plásticos para posteriormente serem utilizados na dosagem e moldagem.

Tabela 11: Características dos agregados

<b>Ensaio</b>	<b>Método</b>	<b>Brita 3/4"</b>	<b>Brita 3/8"</b>
Índice de lamelaridade (%)	DAER/RS-EL 108/01	9,21	15,14
Índice de forma	DNER-ME 086/94	0,85	0,60
Abrasão Los Angeles (%)	DNER-ME 035/98	30,15	-
Durabilidade (ao sulfato de sódio) (%)	DNER-ME 089/94	3,86	3,02
Massa específica real (g/cm <sup>3</sup> )	DNER-ME 081/98 DNER-ME 084/95	2,668	2,860
Massa específica aparente (g/cm <sup>3</sup> )	DNER-ME 081/98	2,625	2,609
Absorção (%)		0,60	0,76

Tabela 12: Distribuição granulométrica dos agregados pétreos e das cales

<b>Peneira</b>		<b>Passante (%)</b>				
<b>n.</b>	<b>mm</b>	<b>Brita 3/4"</b>	<b>Brita 3/8"</b>	<b>Pó de pedra</b>	<b>Cal Calcítica</b>	<b>Cal Dolomítica</b>
3/4"	19,0	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
1/2"	12,70	99,86	100,00	100,00	100,00	100,00
3/8"	9,50	55,71	100,00	100,00	100,00	100,00
n 4	4,76	19,66	85,68	100,00	100,00	100,00
n 10	2,00	2,00	13,60	90,00	100,00	100,00
n 40	0,42	1,41	6,03	61,70	100,00	100,00
n 80	0,18	1,31	4,44	43,10	99,7	99,4
n 200	0,07	1,27	3,62	30,00	96,8	86,7

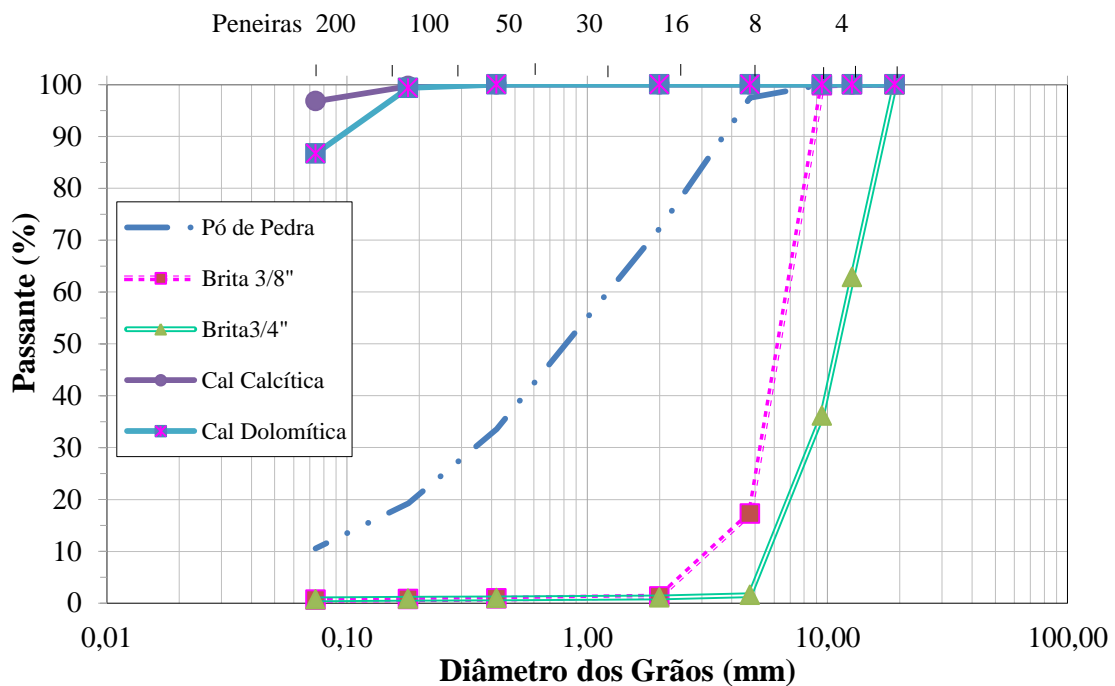


Figura 13: Curvas granulométricas dos agregados e das cales

### 3.1.2 Ligantes Asfálticos

Para o desenvolvimento desta pesquisa foram utilizados dois tipos de ligantes asfálticos, fornecidos por uma empresa que produz e comercializa este tipo de material, conforme descritos abaixo:

- a) Convencional – CAP 50/70: O asfalto CAP 50/70 obtido pelo processo de destilação do petróleo provém de petróleos árabe ou nacionais, para o emprego em serviços de pavimentação ou industrial. Classifica-se de acordo com a sua consistência medida pela penetração (de agulha) à 25°C, em décimos de milímetro.
- b) Modificado por polímero elastomérico – AMP CAP 60/85: é um cimento asfáltico de petróleo modificado por polímero e é classificado, segundo o ponto de amolecimento e recuperação elástica à 25°C. Tem como característica a alta resposta elástica e, devido a esse fato, possui maior resistência à deformação permanente por alongamento e recuperação da sua forma inicial.

Nas tabelas 13 e 14 são apresentados os resultados dos ensaios de caracterização dos dois ligantes utilizados na pesquisa, as normas brasileiras (NBR) utilizadas bem como os limites especificados para cada ensaio.

Tabela 13: Propriedades do ligante convencional (CAP 50/70)

<b>Ensaio</b>	<b>Método</b>	<b>Especificação (ANP, 2005)</b>	<b>Resultado</b>
Penetração a 25°C, 100 g, 5s (0,1 mm)	NBR 6576/01	50-70	51,33
Ponto de amolecimento, mín. (°C)	NBR 6560/08	46	46
Visc. Brookfield 135°C SP 21, 20 rpm, mín. (cP)	NBR 15529/07	274	280
Visc. Brookfield 150°C SP 21, mín. (cP)		112	148
Visc. Brookfield 177°C SP 21 (cP)		57-285	58
Massa específica (kg/m <sup>3</sup> )	NBR 6296/04	-	1003

Tabela 14: Propriedades do ligante modificado por polímero elastomérico (AMP CAP 60/85)

<b>Ensaio</b>	<b>Método</b>	<b>Especificação (ANP, 2010)</b>	<b>Resultado</b>
Penetração a 25°C, 100 g, 5s (0,1 mm)	NBR 6576/01	40-70	48,66
Ponto de amolecimento, mín. (°C)	NBR 6560/08	60	75,9
Visc. Brookfield 135 °C SP 21, 20 rpm, máx. (cP)	NBR 15529/07	3000	1640
Visc. Brookfield 150°C SP 21, 50 rpm, máx. (cP)		2000	855
Visc. Brookfield 177°C SP 21, 100 rpm, máx. (cP)		1000	301
Recuperação elástica, 25°C, 20 cm, mín. (%)	NBR 15086/06	85	96,5
Massa específica (kg/m <sup>3</sup> )	NBR 6296/04	-	1017

### 3.1.3 Aditivo Melhorador de Adesividade

Considerando a insatisfatoriedade obtida no ensaio de adesividade através do procedimento de Ensaio DNER-ME 078/94, mesmo com incorporação de cal calcítica e dolomítica em percentuais de 1%, 2% e 3%, foi necessário a adição de um aditivo melhorador de adesividade. Isso se deve principalmente à característica do agregado granítico, que normalmente apresenta problemas de adesividade. A adesividade entre os materiais depende muito das propriedades físicas, mecânicas e químicas dos seus componentes, influenciando de maneira direta a durabilidade dos pavimentos asfálticos. Os agregados graníticos por serem ácidos ou eletronegativos (altamente silicosos) são hidrofílicos e, portanto, com maior susceptibilidade à ação da água.

Tabela 15: Especificações Técnicas do DOPE

<b>Propriedades</b>	<b>Típico</b>
Consistência a 25°C	Líquida
Densidade 20/4°C	1,01 g/cm <sup>3</sup>
Viscosidade SSF, 50°C	159s
Viscosidade SSF, 25°C	333s
Ponto de Fulgor vaso aberto	210°C
Ponto de Congelamento	-5°C

(Fonte: fornecedor do produto)

### 3.1.4 Cales

Para a obtenção de misturas asfálticas com elevado desempenho e durabilidade, diversos estudos vêm sendo realizados, objetivando o aumento da resistência à fadiga e redução de deformações permanentes. Algumas das soluções largamente estudadas é a incorporação de asfaltos modificados por polímero e a adição de cales hidratada nas misturas asfálticas.

Como já mencionado, as melhorias das propriedades mecânicas das misturas asfálticas dependem diretamente do teor de óxido/hidróxido de cálcio presente na cal. Diferentes tipos de cales e agregados podem resultar em comportamentos totalmente distintos.



Considerando o exposto acima, foram escolhidos dois tipos de cales para o desenvolvimento desta pesquisa, a cal dolomítica, que é originária do Estado do Rio Grande do Sul, e uma cal calcítica, que é produzida no estado de Minas Gerais com alto teor de  $\text{Ca(OH)}_2$ . O emprego das duas cales poderá avaliar os efeitos do teor de óxido/hidróxido de cálcio na adesividade-ligante/agregado, considerando que se trata de um material de origem granítica.

A seguir, é feita uma breve descrição das cales escolhidas para o estudo.

- Cal Calcítica, classificada como CHI

Trata-se de um tipo de cal que é constituída essencialmente de hidróxido de cálcio ou de uma mistura de hidróxido de cálcio e hidróxido de magnésio, com teor de gás carbônico igual ou menor que 5%.

Para a realização deste estudo foi escolhida pelo alto teor de hidróxido de cálcio, visto que a bibliografia internacional, especialmente a estadunidense indica sempre o emprego de cales com elevador teores de  $\text{Ca(OH)}_2$  para a obtenção de melhores resultados quanto a melhorias de adesividade e desempenho das misturas asfálticas. Um teor de  $\text{Ca(OH)}_2$  da ordem de 90% é necessário para otimizar as misturas asfálticas em termos de módulo de resiliência, resistência à tração e adesividade. Considera-se ainda o fato de que no Rio Grande do Sul são produzidas apenas cales com baixos teores de óxidos/hidróxido de cálcio –  $\text{Ca(OH)}_2$ .

- Cal Dolomítica classificada como CHII

Trata-se de um tipo de cal que é constituída essencialmente de uma mistura de hidróxido de cálcio, hidróxido de magnésio, e óxido de magnésio, com teor de gás carbônico igual ou menor que 5%, sem limites para os teores de óxidos não hidratados.

Para a realização deste estudo foi escolhida por ser de uso corrente em obras de engenharia no Rio Grande do Sul, considerando ser a única ocorrência deste tipo de cal no estado. É adicionada geralmente como material de preenchimento (fíler) em diversas obras de pavimentação, sem avançar na discussão sobre a sua qualidade e os efeitos de sua incorporação no desempenho de misturas de concreto asfáltico (CA).

Na Tabela 16 são apresentadas as características químicas das cales utilizadas com os resultados obtidos a partir de uma análise química feita pelo Departamento de Química do CIENTEC – Fundação de Ciência e Tecnologia.

Tabela 16: Características químicas das cales utilizadas na pesquisa

<i>Característica (%)</i>	<i>Calcítica</i>	<i>Dolomítica</i>
<i>Perda ao fogo (1000 ± 50°)</i>	24,1	21,2
<i>Óxido de cálcio (CaO)</i>	72,6	40,9
<i>Óxido de magnésio (MgO)</i>	0,5	26,9
<i>Resíduo insolúvel (SiO<sub>2</sub>)</i>	1,0	9,1
<i>Óxidos de ferro e alumínio (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)</i>	0,7	0,7
<i>Óxido de cálcio (CaO) disponível</i>	66,5	31,6

### 3.1.5 Confeção dos Corpos de Prova

Os corpos de prova para a realização dos diversos ensaios utilizados na pesquisa foram elaborados, utilizando-se a metodologia Marshall, onde foram moldados corpos de prova cilíndricos de 101,6 mm de diâmetro e 63,5±1,3 mm de altura.

O critério usado para a determinação do teor de projeto de ligante asfáltico foi a quantidade encontrada correspondente à um Volume de Vazios de 4%.

Considerando pesquisas já realizadas, optou-se pela incorporação de 1% de cal para cada mistura. Segundo Núñez *et al.* (2007) 1% de incorporação de cal com elevado teor de Ca(OH)<sub>2</sub> foi suficiente para aumentar de forma significativa os valores do módulo de resiliência e resistência à tração. Teores de cal acima de 1% não proporcionaram melhorias adicionais.

Bock (2012) concluiu na sua pesquisa que não se observaram benefícios quando aumentado o teor de cal de 1% para 2%, corroborando com experiências já mencionadas, onde geralmente os teores ótimos de cal estão compreendidos entre 1% e 2%, com relação ao peso seco dos agregados pétreos. O autor constatou ainda uma diminuição dos valores de resistência à tração e Módulo de Resiliência nas misturas em que foram incorporadas 2% de cal.

Considerando ainda, os resultados obtidos no ensaio de adesividade através do procedimento de Ensaio DNER-ME 078/94, verificou-se a necessidade da incorporação de um aditivo melhorador de adesividade, comumente conhecido como DOPE.

A utilização do referido aditivo justificou-se pela necessidade de melhorar a aderência da película de ligante asfáltico sobre a superfície do agregado, recobrindo este de forma adequada.



Figura 14: Preparação das bandejas para a Moldagem Marshall, com as diversas frações de materiais e cal



Figura 15: Corpos de Prova moldados pelo Método Marshall

## 3.2 MÉTODOS

Neste item são descritos os procedimentos laboratoriais necessários para composição e dosagem das misturas asfálticas, bem como os procedimentos empregados para execução dos ensaios que objetivam avaliar a influência da incorporação da cal hidratada e do ligante modificado por polímero elastomérico nas propriedades das misturas asfálticas.

Contudo, conforme já descrito anteriormente, durante a etapa da execução dos experimentos de caracterização dos agregados, devido ao insucesso dos resultados obtidos nos ensaios de adesividade (realizados pelo método DNER-ME 078/94 e ABNT NBR 12583/92), verificou-se a necessidade de alterações na pesquisa. Objetivando a obtenção de resultados satisfatórios nesta característica tecnológica, optou-se por incluir nos projetos um aditivo melhorador de adesividade (DOPE).

Concluída a caracterização dos agregados e ligantes para a composição das misturas asfálticas, iniciou-se então o procedimento de dosagem dos concretos asfálticos. Para a determinação do teor de ligante de projeto foi adotado o método de dosagem Marshall. Os ensaios empregados para analisar as propriedades mecânicas e caracterização das misturas asfálticas são: Resistência à tração por compressão diametral, Módulo de Resiliência, ensaios para verificação quanto à fadiga (ensaio dinâmico de compressão diametral) e por fim os ensaios de caracterização da resistência aos efeitos deletérios causados pela umidade através da metodologia AASHTO T 283-89 .

### 3.2.1 Determinação das Curvas Granulométricas

As curvas granulométricas para o projeto das misturas asfálticas foram obtidas a partir de tentativas, objetivando o enquadramento das mesmas na Faixa C do DNIT, de acordo com a Norma DNIT 031/2006-ES. Para isso estipulou-se porcentagens para cada uma das frações (3/4", 3/8", pó de pedra e cal). As referidas curvas serão apresentadas a seguir.

A composição granulométrica das misturas que serão estudadas, serão compostas pelas seguintes proporções dos materiais:

- Mistura Referência com ligante convencional+DOPE e Mistura Referência com ligante modificado+DOPE: 30% de brita 3/4", 20% de brita 3/8" e 50% de pó de pedra, resultando na curva de composição granulométrica, mostrada na Figura 16.

- Mistura Referência com ligante convencional+DOPE+1% de cal Calcítica e Mistura Referência com ligante convencional+DOPE+1% de cal Calcítica: 30% de brita 3/4", 20% de brita 3/8", 49% de pó de pedra e 1% cal (calcítica), resultando na curva de composição granulométrica, mostrada na Figura 17.
- Mistura Referência com ligante modificado+DOPE+1% de cal Dolomítica e Mistura Referência com ligante modificado+DOPE+1% de cal Dolomítica: 30% de brita 3/4", 20% de brita 3/8", 49% de pó de pedra e 1% cal (dolomítica), resultando na curva de composição granulométrica, mostrada na Figura 18.

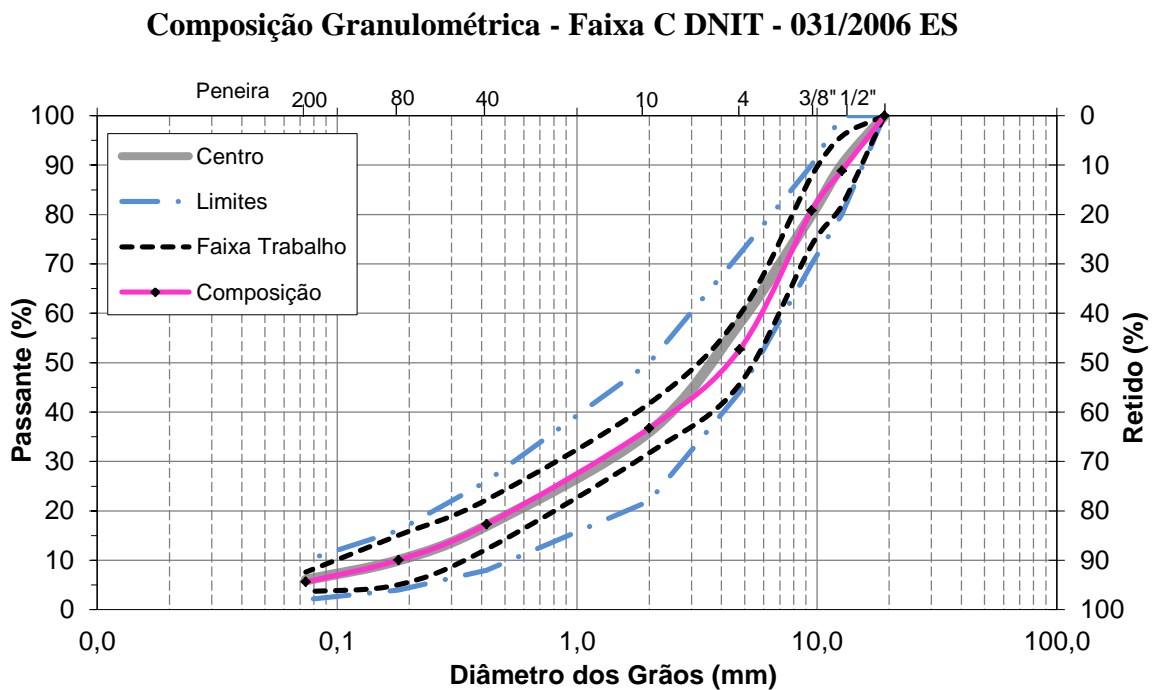


Figura 16: composição granulométrica mistura de referência com ligante convencional e modificado

### Composição Granulométrica - Faixa C DNIT - 031/2006 ES

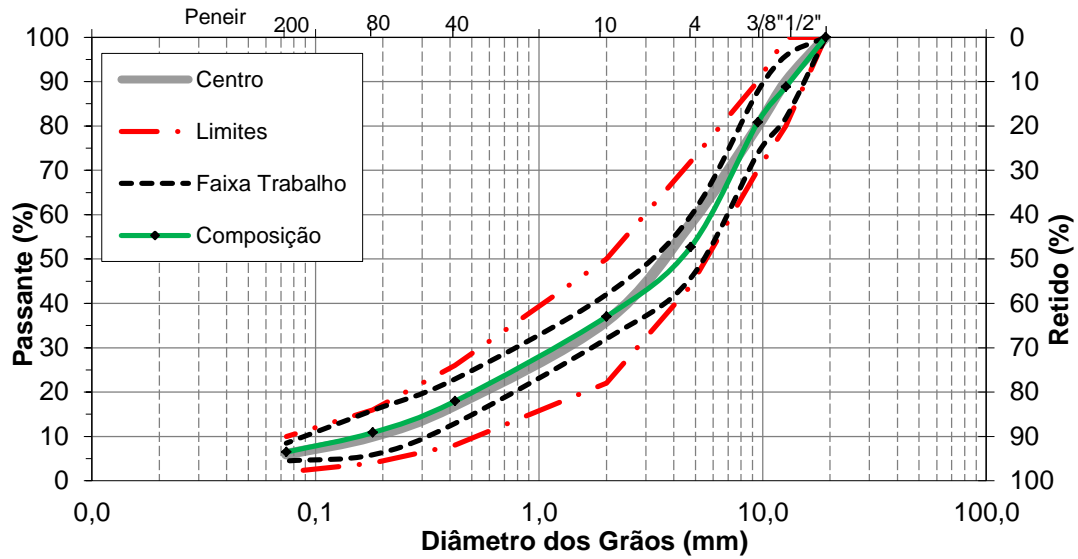


Figura 17: composição granulométrica mistura com 1% de cal calcária

### Composição Granulométrica - Faixa C DNIT - 031/2006 ES

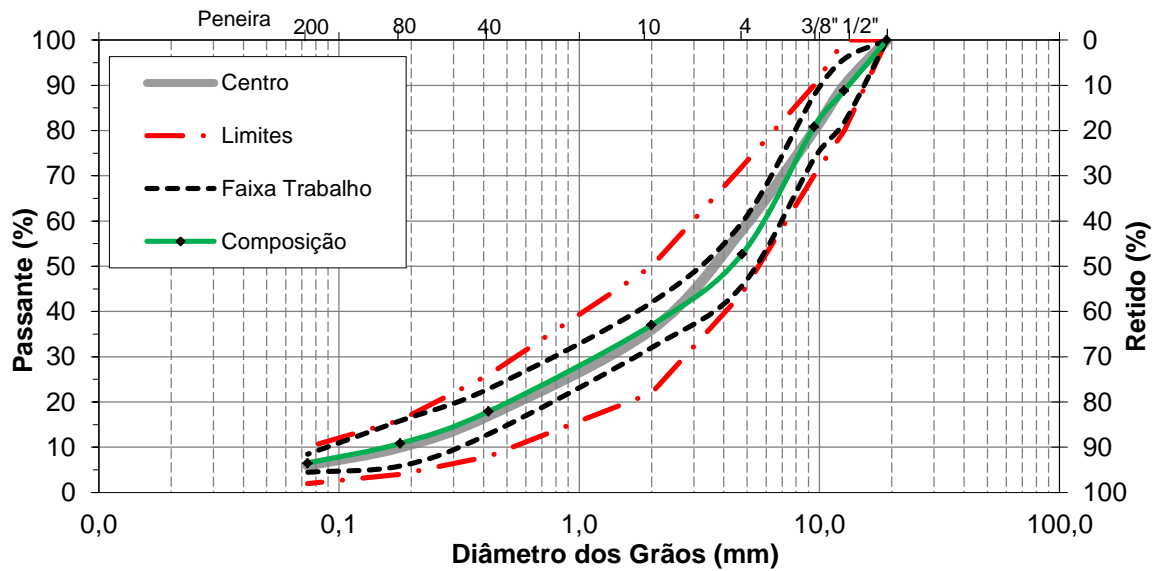


Figura 18: composição granulométrica mistura com 1% de cal dolomítica

### 3.2.2 Dosagem Marshall

A aplicação de revestimentos asfálticos deve ser precedida de ensaios que permitam a obtenção do teor de projeto do ligante a ser utilizado na mistura, para que a mesma se enquadre dentro de especificações que são definidas com a finalidade de evitar a degradação prematura da mistura, seja por falta ou excesso de ligante asfáltico. Através da dosagem Marshall determina-se essa quantidade de ligante que deve ser utilizada nas misturas asfálticas usinadas a quente, destinadas à pavimentação.

A Figura 19 demonstra claramente a grande importância da dosagem adequada de ligante asfáltico. Uma deficiência do mesmo na composição da mistura asfáltica poderá ocasionar problemas como desagregação e trincamento por fadiga enquanto o excesso de ligante pode acarretar em deformações excessivas na camada de revestimento (deformações plásticas), quando submetido à ação do tráfego. Ambos os casos acabam por comprometer o pavimento no seu desempenho, de forma a reduzir a vida útil do mesmo.



Figura 19: Demonstração da importância da dosagem adequada (adaptado de OHL BRASIL)

Na dosagem das misturas asfálticas escolhe-se um teor de ligante asfáltico, denominado de teor de projeto, a partir de uma faixa granulométrica predefinida e de outros resultados

experimentais. Esse teor de projeto varia de acordo com o método de dosagem e depende de parâmetros como forma e energia de compactação, tipo de mistura asfáltica, temperatura de serviço, etc.

A dosagem Marshall é o método de dosagem de misturas asfálticas mais difundido no Brasil, sendo possível a determinação da estabilidade, que é a resistência máxima à compressão diametral e a fluência, que corresponde à deformação total apresentada pelo corpo de prova, desde a aplicação da carga inicial nula até a aplicação da carga máxima. Outro fator relevante para sua ampla utilização é devido à simplicidade de execução e baixo custo dos equipamentos.

Para a preparação dos corpos de prova para cada dosagem de mistura, foram determinadas as porcentagens dos diversos agregados utilizados, bem como a porcentagem do ligante asfáltico, de maneira a satisfazer os requisitos mínimos de estabilidade e durabilidade da mistura asfáltica.

Os agregados foram secados até a massa constante em estufa e separadas cada uma das frações granulométricas, empregando as peneiras da especificação do DNIT. Após, cada fração foi lavada, secada e acondicionada em sacos plásticos devidamente identificados.

Após essa etapa foi realizada a pesagem e mistura dos agregados, a partir do ajuste granulométrico. Os agregados serão pesados em bandejas metálicas, e levados à estufa para aquecimento. Como a cal hidratada foi incorporada diretamente no agregado graúdo, estes serão colocados em bandejas separadas (agregado graúdo em uma e agregado miúdo em outra).

Na presente pesquisa serão analisados seis tipos de misturas asfálticas, conforme descrito na tabela 17.



Tabela 17: Características das Misturas Asfálticas estudadas

MISTURA	COMPOSIÇÃO DA MISTURA ASFÁLTICA
1	Mistura Referência com ligante convencional+DOPE
2	Mistura Referência com ligante modificado+DOPE
3	Mistura com ligante convencional+DOPE+1% de cal Calcítica
4	Mistura com ligante convencional+DOPE+1% de cal Dolomítica
5	Mistura com ligante modificado+DOPE+1% de cal Calcítica
6	Mistura com ligante modificado+DOPE+1% de cal Dolomítica

Serão adotados 5 teores de ligantes para os diferentes grupos de corpos de prova a serem moldados. Para cada um desses grupos serão moldados 3 corpos de prova que serão utilizados para o ensaio Marshall. Cada CP terá massa de agregado de aproximadamente 1.250g. Também foi separado 1.250g de massa de mistura asfáltica para a realização do ensaio Rice.

A cal hidratada foi adicionada ao agregado graúdo (1% do peso total da mistura mineral), e em seguida misturada de forma que todo o agregado seja recoberto. Em seguida foi adicionado o material fino, aquecida a mistura até a temperatura de usinagem e incorporado o ligante asfáltico.

Cabe ressaltar que foi utilizado em todas as misturas um aditivo melhorador de adesividade. Este aditivo foi introduzido previamente ao ligante asfáltico e misturado de forma que os dois materiais fiquem bem incorporados. Após, foi adicionada esta combinação de DOPE com ligante para a composição da mistura.

Depois de efetuada a mistura entre os agregados, a cal e o ligante asfáltico de forma mecânica foi feita a compactação das amostras em compactador mecânico tipo Marshall. Após a compactação, as amostras ficaram em repouso durante 24 h e então extraídas dos moldes, identificadas, medidas, pesadas e encaminhadas para a execução dos ensaios específicos (obtenção da estabilidade e fluência).

Cabe destacar que a escolha das temperaturas de mistura e de compactação foi feita da seguinte forma:

- Para o CAP 50/70: Foi realizado o ensaio com viscosímetro Brookfield, utilizando spindle 21, a 135, 150 e 177°C. Estas temperaturas são as especificadas pela ANP (2005). Contudo foram utilizadas as temperaturas de mistura e de compactação fornecidas pelo fabricante do ligante asfáltico utilizado na pesquisa.
- Ligante modificado por polímero (AMP CAP 60/85): Segundo o Asphalt Institute (2007), para execução de projetos com ligantes modificados, devem-se atender as recomendações de temperaturas de mistura e de compactação fornecidas pelo fabricante. Portanto, este critério foi aplicado para a realização desta pesquisa. As temperaturas de aquecimento em laboratório indicadas pelo fornecedor são apresentadas na tabela 18.

Tabela 18: Temperaturas de mistura e de compactação para laboratório

Temperaturas (°C)	CAP 50/70	AMP CAP 60/85
Ligante asfáltico	153	165
Agregado	163	175
Compactação	140	155

(Fonte: fornecedor dos ligantes)

A determinação do teor de projeto de ligante asfáltico irá corresponder a um VV (Volume de Vazios) de 4%.

### 3.2.3 Resistência à tração por compressão diametral (RT)

O ensaio de resistência à tração indireta por compressão diametral foi desenvolvido pelo professor Lobo Carneiro no Rio de Janeiro em 1943 com a finalidade de avaliar a resistência à tração de concreto de cimento Portland (Carneiro, 1943). Conhecido também como “ensaio brasileiro”, este teste determina a resistência à tração indireta através da compressão diametral de corpos de prova cilíndricos carregado verticalmente.

Este ensaio tem sido adotado desde 1972 para a caracterização de misturas asfálticas, porém com a aplicação das forças através de frisos de carga no corpo de prova cilíndrico Marshall convencional, visto que este apresenta superfície lateral irregular e é bem mais deformável.

O ensaio de resistência à tração indireta por compressão diametral consiste na aplicação de um esforço no corpo de prova que é dado por duas forças de compressão concentradas e diametralmente opostas em um cilindro, que geram, ao longo do diâmetro solicitado, tensões de tração uniformes perpendiculares a esse diâmetro (MEDINA e MOTTA, 2005).

O ensaio é realizado de acordo com a Norma DNER –ME138/94, conforme descrito abaixo:

- Mede-se a altura (H) do corpo-de-prova com um paquímetro em quatro posições diametralmente opostas, adotando como altura a média aritmética das quatro leituras;
- Mede-se o diâmetro (D) do corpo-de-prova com um paquímetro, em três posições, adotando como diâmetro a média aritmética das três leituras;
- Após coloca-se o corpo-de-prova na estufa, ou sistema de refrigeração, por um período de duas horas, de modo a se obter a temperatura requerida (25, 30, 45 ou 60°C).
- Ajusta-se os pratos da prensa até que seja obtida uma leve compressão, capaz de manter o corpo-de-prova em posição;
- Por fim, aplica-se a carga progressivamente, com velocidade de deformação de  $0,8 \pm 0,1$  mm/s, até que ocorra a ruptura do corpo-de-prova segundo o plano diametral vertical e anota-se o valor da carga de ruptura. Com o valor da carga de ruptura (F) obtido é calculada a resistência à tração do corpo-de-prova rompido por compressão diametral, através da expressão descrita abaixo:

$$\sigma_t = \frac{2F}{\pi DH}$$

Onde:

$\sigma_t$  = Resistência à tração;

F = carga de ruptura;

H = altura do corpo de prova;

D = diâmetro do corpo de prova.

As etapas descritas acima foram as adotadas para a realização do ensaio e o equipamento utilizado foi o que está identificado na Figura 20.



Figura 20: Equipamento para ensaio de resistência à tração

### 3.2.4 Módulo de resiliência (MR)

O ensaio de Módulo de resiliência (MR) em misturas asfálticas é realizado aplicando-se uma carga repetidamente no plano diametral vertical de um corpo de prova cilíndrico regular. Esta carga gera uma tensão de tração transversalmente ao plano de aplicação da carga. Mede-se então o deslocamento diametral recuperável na direção horizontal correspondente à tensão gerada, numa dada temperatura (T).

De acordo com a NBR 16018/2011, o equipamento utilizado é composto por uma estrutura metálica, um pistão que proporciona um carregamento repetido pulsante com auxílio de um dispositivo pneumático, acoplado a um regulador de tempo e frequência de 1Hz. O equipamento funciona dentro de uma câmara com temperatura controlada. O procedimento de ensaio é não destrutivo, isto é, o corpo de prova não é levado à ruptura e o carregamento usado é da magnitude equivalente a um percentual da resistência à tração da amostra.

O tipo de sensor de deslocamento utilizado é do tipo LDTV preso ao corpo de prova por meio de um suporte. O princípio de funcionamento dos transdutores LDTV consiste em transformar as deformações durante o carregamento repetido em potencial elétrico, cujo valor é registrado em oscilógrafo.

O coeficiente de Poisson sugerido é de 0,30, valor comumente adotado no Brasil.

A Figura 21 apresenta um corte esquemático do equipamento utilizado para a realização do ensaio de Módulo de resiliência (MR) em misturas asfálticas.

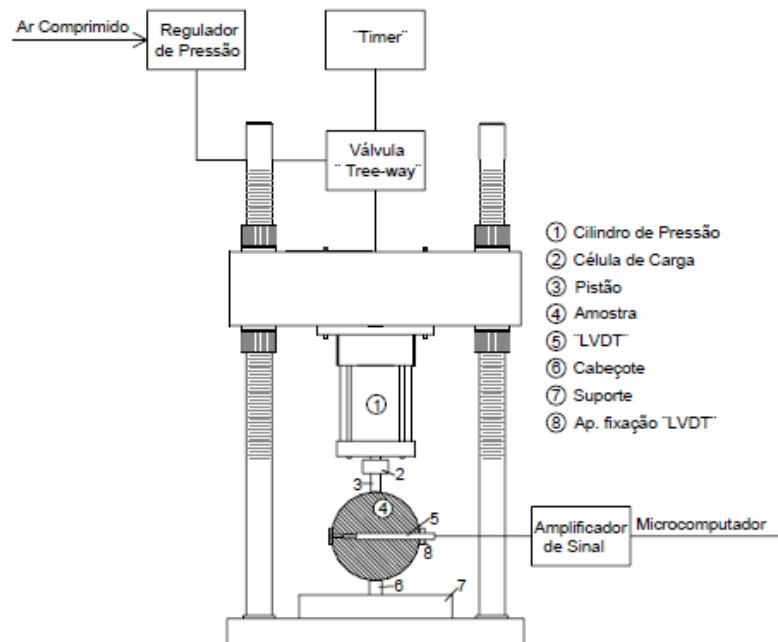


Figura 21: Corte esquemático do equipamento de módulo de resiliência (Specht, 2004).

Os valores dos Módulos de Resiliência são calculados através da expressão:

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

Onde:

MR = Módulo de Resiliência, em MPa

F= carga vertical repetida aplicada diametralmente ao corpo de prova, em N;

$\Delta$ = deslocamento total, em mm

H = altura do corpo de prova, em mm

$\mu$ = coeficiente de Poisson (0,30)

### 3.2.5 Resistência à Fadiga

Devido à facilidade de execução, principalmente na moldagem dos corpos de prova (Metodologia Marshall), do sistema de carregamento e da operação mais simples do equipamento de carga repetida, a realização do ensaio de fadiga por compressão diametral à tensão controlada, através de equipamento pneumático é a mais usual no Brasil.

O ensaio de compressão diametral para fadiga de misturas asfálticas é um ensaio de tração indireta conduzido com cargas repetidas em vários corpos de prova cilíndricos da mesma mistura, moldados nas mesmas condições. São aplicadas cargas de compressão diametralmente ao corpo de prova. Este corpo de prova é então submetido a um estado biaxial de tensões, sendo que seções verticais do mesmo ficam sujeitas à esforços de compressão e seções horizontais, por sua vez, a esforços de tração.

O equipamento empregado para a realização do ensaio de compressão diametral para fadiga de misturas asfálticas segue o mesmo princípio do equipamento utilizado para o ensaio de Módulo de Resiliência. Assim como descrito por COLPO (2014), a determinação da vida de fadiga das misturas asfálticas desta pesquisa foi realizada à tensão controlada onde se aplicaram nas amostras uma carga  $F$  que induza tensões de tração horizontais aproximadamente entre 10 e 50 % da tensão de ruptura à tração ( $RT$ ) previamente determinada.

Ainda, conforme descrito por COLPO (2014), o ensaio é realizado em um equipamento que possui uma estrutura metálica, com um pistão que proporciona um carregamento repetitivo pulsante com auxílio de um dispositivo pneumático, que é acoplado a um regulador de tempo e frequência de 1Hz.

Conforme é aplicado o carregamento, com 0,1 segundo e 0,9 segundo de repouso, a amostra sofre deformações horizontais que são medidas por um LVDT, ligado a um computador.

A determinação do carregamento vertical ( $F$ ) de acordo com a  $RT$  e o nível de tensão é realizada de acordo com a expressão:

$$F = \frac{100\pi dh(\%Rt)}{2}$$

Onde:

$F$  = Carga aplicada (N)

$RT$  = Resistência à tração (MPa)

(%RT) = Nível de Carga em relação à  $RT$  (MPa)

$d$  = diâmetro do corpo de prova (cm)

$h$  = altura do corpo de prova (cm)

A Figura 22 mostra o equipamento utilizado para a realização do ensaio de fadiga por compressão diametral à tensão controlada no Laboratório de Pavimentação da UFRGS - LAPAV.



Figura 22: Equipamento utilizado pelo LAPAV/UFRGS para realização do ensaio de fadiga por compressão diametral

Já na Figura 23 está representado o sistema de ensaio de fadiga por compressão diametral para as misturas asfálticas do LAPAV/UFRGS – SEEPAV 8200.



Figura 23: sistema de aquisição e controle de dados do equipamento de ensaio de fadiga por compressão diametral (Colpo, 2014).

Para a realização do ensaio faz-se necessário inserir dados como identificação, altura, diâmetro e resistência à tração do corpo de prova que está sendo ensaiado, além da determinação do percentual de resistência à tração por compressão diametral em que a carga será aplicada, o número máximo de ciclos para o ensaio e o percentual de redução do módulo de resiliência.

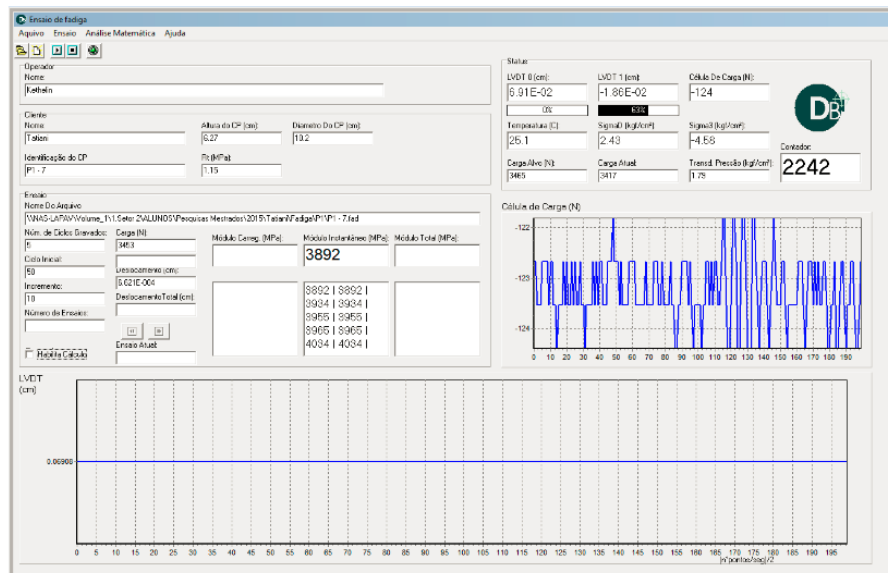


Figura 24: Tela principal do SEEPAV 8200



O ensaio em compressão diametral gera um estado biaxial de tensão em um corpo-de-prova cilíndrico, conforme ilustrado na Figura 25. No decorrer do ensaio de fadiga, a deformação de tração aumenta até o rompimento completo do corpo-de-prova.

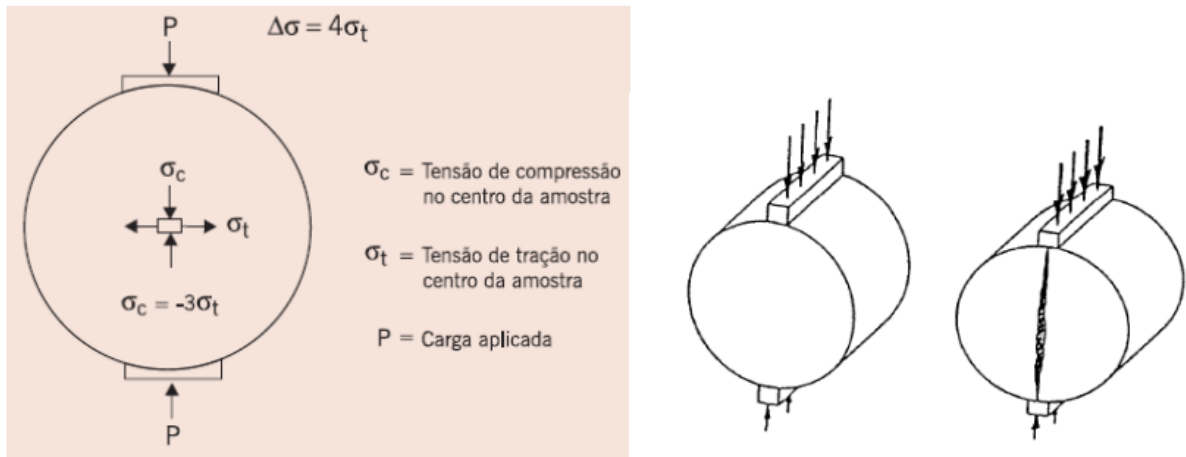


Figura 25: Representação das tensões no centro da amostra de um corpo de prova cilíndrico

Os resultados dos ensaios sob tensão controlada podem ser expressos pelos modelos abaixo descritos:

- a) Para diferença de tensões ( $N_f \times \Delta\sigma$ ):

$$N_f = K_I \left( \frac{1}{\Delta\sigma} \right)^{n_I}$$

Onde:

$N_f$  = Vida de Fadiga da amostra, ou seja, número de solicitações necessárias à ruptura completa do corpo de prova;

$\Delta\sigma$  = diferença algébrica entre as tensões de tração e de compressão no centro do corpo de prova;

$K_I, n_I$  = parâmetros de fadiga determinados em laboratório

- b) Para tensão de tração ( $N_f \times \Delta\sigma$ ):

$$N_f = K_2 \left( \frac{1}{\Delta\sigma_t} \right)^{n_2}$$

Onde:

$N_f$  = Vida de Fadiga da amostra, ou seja, número de solicitações necessárias à ruptura completa do corpo de prova;

$\sigma_t$  = tensão de tração

$K_2, n_2$  = parâmetros de fadiga determinados em laboratório

c) Deformação de tração inicial ( $N_f \times \varepsilon_i$ ):

$$N_f = K_3 \left( \frac{1}{\varepsilon_i} \right)^{n_3}$$

Onde:

$N_f$  = Vida de Fadiga da amostra, ou seja, número de solicitações necessárias à ruptura completa do corpo de prova;

$\varepsilon_i$  = deformação específica de tração inicial, medida no centro do corpo de prova

$K_3, n_3$  = parâmetros de fadiga determinados em laboratório

Para esta pesquisa, a determinação da Vida de Fadiga foi obtida a partir do ensaio de tração indireta por compressão diametral, sendo que os percentuais de resistência à tração por compressão diametral foram de 30%, 40% e 50%.

### 3.2.6 Resistência ao dano por umidade induzida

Conforme preconiza as normas AASHTO T 283-89 ou ASTM D4867 (Normas que serviram como referência para a elaboração da Norma Brasileira ABNT NBR 15617, para a determinação do dano por umidade induzida), o ensaio AASHTO T 283-89 avalia as

propriedades quanto à adesividade dos agregados e do ligante asfáltico em misturas asfálticas, considerando o efeito deletério da água.

A Norma que regulamenta o ensaio para a avaliação da adesividade agregado-ligante é a norma ABNT NBR 15617, que permite a partir do resultado do ensaio estimar o deslocamento da película de ligante do agregado nos concretos asfálticos e a avaliar os melhoradores de adesividade como a cal hidratada e o DOPE, que são adicionados aos agregados.

O ensaio consiste na moldagem de, no mínimo, 6 corpos de prova, divididos em dois grupos. Estes corpos de prova são compactados com volume de vazios variando entre  $7 \pm 1$  %.

No primeiro grupo os corpos de prova não condicionados são submetidos à ruptura por compressão diametral a 25°C. Obtêm-se assim, com a média dos três resultados o valor de  $RT_1$ .

Já o segundo grupo é submetido a um condicionamento simulando a presença de água na mistura e tensões internas induzidas por cargas, envolvendo as seguintes etapas: primeiramente é feita a saturação a vácuo (entre 55% e 80%), em seguida, aplica-se um ciclo de congelamento (-18°C durante um período de 16 horas) e imersão em banhos de água (60°C por um período de 24 horas).

Depois do condicionamento, os corpos de prova são ensaiados para a determinação da resistência à tração por compressão diametral e a média dos três valores da origem a  $RT_2$ , considerando que estes corpos de prova também devem ficar imersos por 2 horas a 25°C, para que a condição no momento do ensaio seja a mesma.

A análise é feita pela relação entre a resistência à tração de amostras com condicionamento prévio e amostras sem condicionamento. Esta relação é denominada Resistência Retida à Tração (RRt), conforme equação a seguir:

$$RRt = \frac{RT_1}{RT_2} * 100$$

Onde:

RRt = Resistência Retida à Tração (%);

$RT_1$  = Resistência à Tração de Amostras com Condicionamento;

$RT_2$  = Resistência à Tração de Amostras sem Condicionamento;

O resultado desta relação pode ser utilizado para prever o desempenho de misturas asfálticas, em campo (4 à 12 anos), face a adesividade ligante/agregado e também para verificar o efeito da adição de aditivos químicos ou pulverulentos, na adesividade da mistura (SPECHT, 2004). O valor encontrado na literatura como referência de misturas com bom desempenho quanto a adesividade é de 70% (HICKS, 1991), e a Metodologia SUPERPAVE recomenda valores acima de 80% (BOCK, 2012).

## **4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS**

Neste capítulo são apresentados e analisados os resultados obtidos nos ensaios laboratoriais. Os procedimentos seguiram as metodologias descritas no capítulo 3. Portanto, são apresentados e analisados os resultados no que se refere aos ensaios de resistência à tração por compressão diametral, módulo de resiliência, fadiga por compressão diametral e dano por umidade induzida e a influência da incorporação de cal nestes resultados.

### **4.1 PARÂMETROS DA DOSAGEM MARSHALL**

Os resultados apresentados a seguir foram obtidos utilizando-se a Dosagem Marshall para a elaboração das misturas asfálticas, sendo que foram elaboradas com agregados de rocha granítica, cimento asfáltico de petróleo convencional (CAP 50/70) e modificado por polímero elastomérico (AMP CAP 60/85), aditivo melhorador de adesividade e cal hidratada dos tipos calcítica e dolomítica.

Definida como forma de incorporação da cal sendo da forma seca sobre agregado graúdo, procedeu-se a substituição de 1% do pó-de-pedra da composição granulométrica de quatro misturas pela mesma quantidade de cal, buscando assim manter o volume de vazios de 4%, considerando o critério usado para a determinação do teor de projeto de ligante.

Assim, procedeu-se a determinação dos parâmetros da dosagem Marshall, conforme apresentado nas tabelas 19 e 20 e representados graficamente através das Figuras 26 e 27. Observou-se que o teor de ligante de projeto sofreu uma redução, quando incorporada a cal hidratada do tipo dolomítica e aumento do teor quando incorporada a cal hidratada do tipo calcítica.

Tabela 19: Resultados para misturas com ligante modificado CAP 50/70 nos respectivos teores de projeto (Referência, Cal Calcítica e Cal Dolomítica)

Propriedades	Especificação DNIT-ES 031/2004	Misturas com CAP 50/70		
		Referência	Cal Calcítica	Cal Dolomítica
Teor de Ligante (%)	-	4,3	4,5	3,7
Volume de Vazios (%)	3 a 5	4	4	4
Relação Betume Vazios (%)	75 a 82	71,6	75,08	71,25
Vazios do Agregado Mineral (%)	>15	14,2	14,3	12,87
Massa Esp. Aparente (kg/m <sup>3</sup> )	-	2360	2328	2393
Estabilidade (kN)	>500	1262,5	1567,3	1773,4
Fluência (mm)	8 a 18	9,96	9,41	12,63

Tabela 20: Resultados para misturas com ligante modificado AMP CAP 60/85 nos respectivos teores de projeto (Referência, Cal Calcítica e Cal Dolomítica)

Propriedades	Especificação DNIT-ES 031/2004	Misturas com AMP CAP 60/85		
		Referência	Cal Calcítica	Cal Dolomítica
Teor de Ligante (%)	-	4,5	4,6	4,4
Volume de Vazios (%)	3 a 5	4	4	4
Relação Betume Vazios (%)	75 a 82	72,50	72,42	72,53
Vazios do Agregado Mineral (%)	>15	14,49	14,77	11,69
Massa Esp. Aparente (kg/m <sup>3</sup> )	-	2361	2340	2371
Estabilidade (kN)	>500	1417,92	1203,13	1464,02
Fluência (mm)	8 a 18	10,65	17,35	10,82

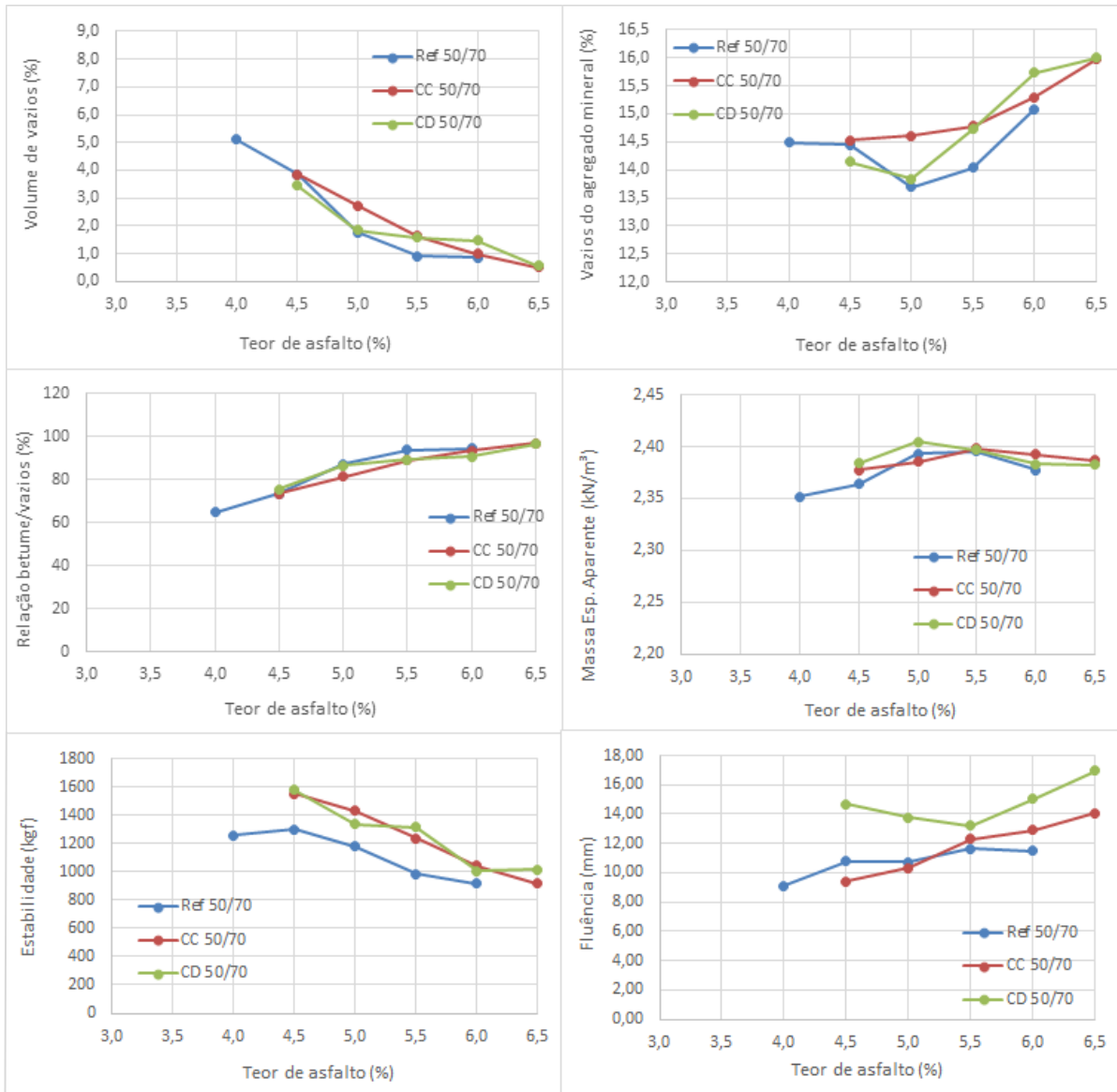


Figura 26: Parâmetros de Dosagem Marshall (CAP 50/70) das misturas com incorporação de Cal calcítica (CC) e cal dolomítica (CD) em relação à mistura de Referência

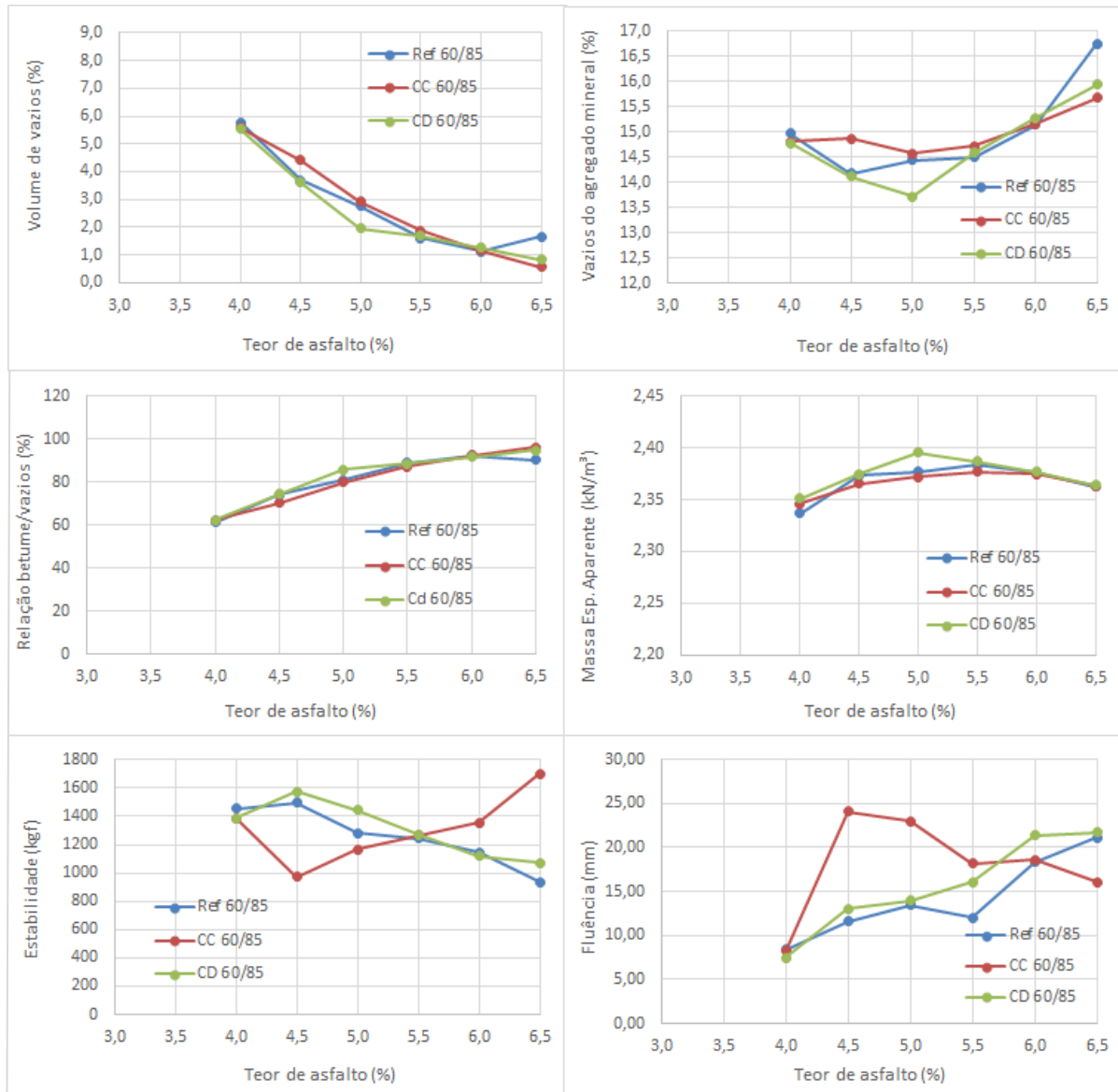


Figura 27: Parâmetros de Dosagem Marshall (AMP CAP 60/85) das misturas com incorporação de Cal calcária (CC) e cal dolomítica (CD) em relação à mistura de Referência

Para todas as misturas em análise, a tendência de variação do teor de projeto de ligante asfáltico seguiu o mesmo padrão, tanto para as misturas com ligante convencional quanto com modificado.

Outro fato observado, ao analisarem-se os parâmetros de dosagem das misturas, foi o aumento da fluência e estabilidade das misturas elaboradas com cal dolomítica.



Na Tabela 20 verifica-se que os valores de RBV foram bastante semelhantes, sendo inferiores ao limite especificado, com exceção da mistura elaborada com ligante convencional e cal calcítica. Além disso, as misturas com incorporação de cal dolomítica apresentaram diminuição do VAM em relação às misturas de Referência, que já apresentavam valores abaixo da especificação. Parte da explicação para este fato está nas características dos agregados e de britagem, evento já observado em outros projetos de misturas realizados no LAPAV.

## 4.2 ADESIVIDADE DO AGREGADO/LIGANTE

Para a verificação inicial do comportamento do agregado granítico em relação à adesividade, optou-se pela realização do ensaio visual, normatizado através do método DNER-ME 078-94.

O ensaio consiste em verificar se o agregado possui boa adesividade, ou seja, permaneça totalmente recoberto de ligante asfáltico, após ter sido submetido à ação da água. O resultado é considerado satisfatório ou não satisfatório, dependendo da porcentagem da área dos agregados que permanecem recobertos pela película de ligante asfáltico após a imersão.

Conforme já mencionado no Capítulo 3 – Materiais e Métodos, foram realizadas diferentes maneiras de avaliação da adesividade, sem obter-se nenhum resultado satisfatório. Os procedimentos são relacionados a seguir:

- Agregado+ ligante convencional: resultado não satisfatório
- Agregado+ ligante convencional+cal calcítica 1%: resultado não satisfatório
- Agregado+ ligante convencional+cal calcítica 2%: resultado não satisfatório
- Agregado+ ligante convencional+cal dolomítica 1%: resultado não satisfatório
- Agregado+ ligante convencional+cal dolomítica 2%: resultado não satisfatório
- Agregado+ ligante modificado: resultado não satisfatório
- Agregado+ ligante modificado + cal calcítica 1%: resultado não satisfatório
- Agregado+ ligante modificado + cal calcítica 2%: resultado não satisfatório
- Agregado+ ligante modificado + cal dolomítica 1%: resultado não satisfatório
- Agregado+ ligante modificado + cal dolomítica 2%: resultado não satisfatório

Apesar de normalmente ser recomendada pela literatura a adição de um teor de cal hidratada que varia de 1 a 2%, avaliou-se também o comportamento do agregado quanto à adesividade incorporando 3% de cal (tanto calcítica quanto dolomítica), contudo o resultado permaneceu não satisfatório.

Outra tentativa realizada foi a alteração da forma de incorporação da cal hidratada. Enquanto nos ensaios acima relacionados a cal foi adicionada seca sobre o agregado também seco, a adição da cal pelo processo denominado “marinado” foi uma alternativa proposta.

A marinação consiste em deixar a cal hidratada agindo diretamente no agregado por um período que pode variar de 24 a 48 horas. O objetivo deste processo de marinação é permitir um melhor tratamento da cal nos agregados. O período de marinação não deve se estender muito devido ao risco de recarbonatação da cal hidratada.

Com a realização do procedimento acima descrito também se obteve resultados não satisfatórios.

A alternativa encontrada para obter-se então um desempenho favorável quanto à adesividade foi a inclusão de um aditivo melhorador de adesividade (DOPE), objetivando reduzir ou eliminar prováveis danos causados pela umidade devido ao descolamento da película do material betuminoso. Após a incorporação de diferentes teores de DOPE, obtiveram-se resultados satisfatórios com a adição de 0,3% deste aditivo.

As Figuras 29 a 31 ilustram alguns dos ensaios supracitados e evidenciam a não satisfatoriedade dos resultados quando os procedimentos são realizados sem a adição do aditivo melhorador de adesividade.



Figura 28: Amostra ensaiada



Figura 29: Antes e depois da amostra ensaiada com ligante modificado sem cal



Figura 30: Antes e depois da amostra ensaiada com ligante modificado +1% de cal calcítica



Figura 31: Antes e depois da amostra ensaiada com ligante modificado +1% de cal dolomítica



Figura 32: Antes e depois da amostra ensaiada com ligante convencional+0,3% de DOPE

#### 4.3 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL

Neste item são apresentados os resultados da Resistência à Tração por Compressão Diametral (RT) das seis misturas estudadas. Na tabela 21 é feita uma compilação dos resultados obtidos para as seis misturas estudadas, bem como médias e desvio padrão.

Tabela 21: Resultados da resistência à Tração das misturas asfálticas estudadas

Mistura	RT1	RT2	RT3	Média	Desvio Padrão	Coef. de variação %
Ref 50/70	1,18	1,06	1,21	1,15	0,08	6,90
Ref 60/85	1,49	1,50	1,45	1,48	0,03	1,79
CC 50/70	1,24	1,22	1,17	1,21	0,04	2,98
CC 60/85	1,23	1,26	1,29	1,26	0,03	2,38
CD 50/70	1,36	1,30	1,25	1,30	0,06	4,24
CD 60/85	1,77	1,63	1,79	1,73	0,09	5,04

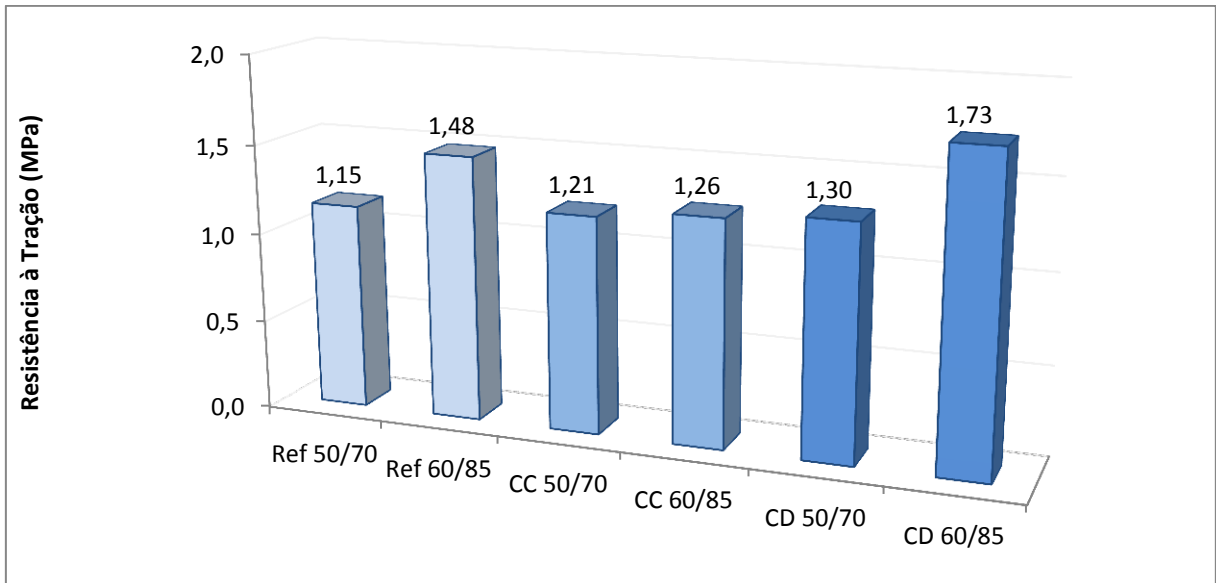


Figura 33: Resistência à tração por compressão diametral a 25° das seis misturas analisadas onde: Ref são misturas sem incorporação de cal; CC são misturas com incorporação de Cal Calcítica e CD são misturas com incorporação de Cal Dolomítica

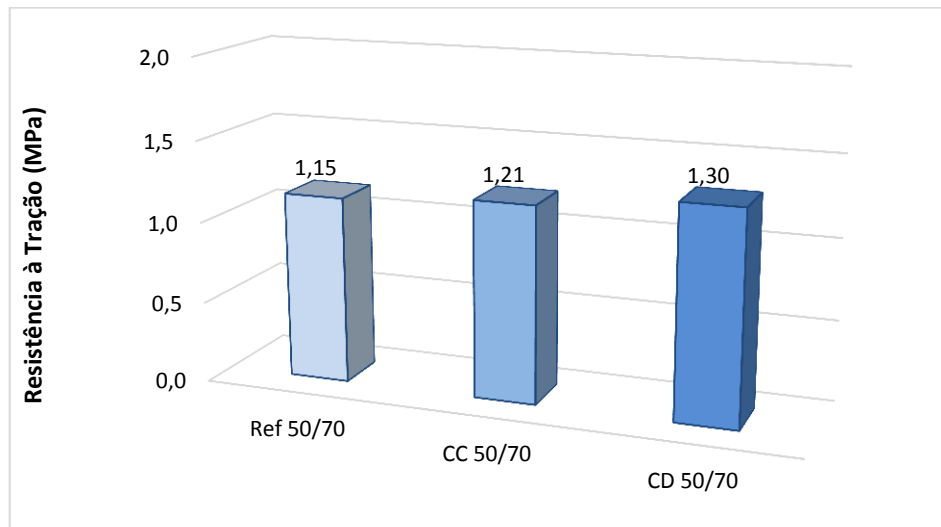


Figura 34: Resistência à tração por compressão diametral a 25° das três misturas elaboradas com Ligante Convencional

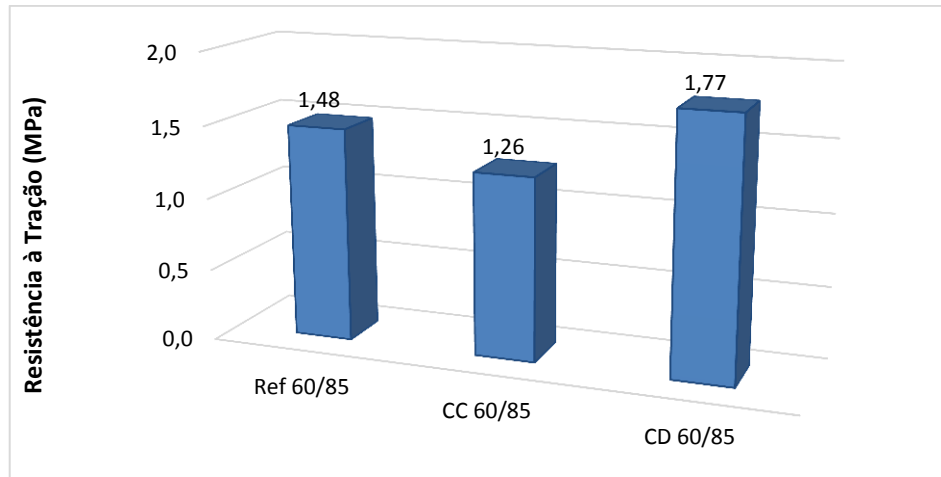


Figura 35: Resistência à tração por compressão diametral a 25° das três misturas elaboradas com Ligante Modificado

Como pode-se observar, as misturas que apresentaram maiores valores de resistência à tração foram as elaboradas com ligante modificado, confirmando que a adição do ligante modificado por polímero melhora a Resistência à Tração da mistura. Em relação à incorporação de cal hidratada, observou-se um aumento da RT quando adicionada cal do tipo dolomítica mesmo elas tendo um valor do teor de ligante asfáltico menor em relação às demais. O ganho no valor da RT quando incorporada cal dolomítica foi de 13% em relação à mistura de referência elaborada com ligante convencional e de aproximadamente 17% em relação à mistura de referência elaborada com ligante modificado.

Pode - se observar ainda, que em relação à mistura CC 60/85, ou seja, elaborada com a incorporação de cal calcítica e ligante modificado, houve uma redução no valor da resistência à tração em relação à mistura de referência.

Os valores médios dos resultados de resistência à tração por compressão diametral foram utilizados nas taxas de tensões de tração para a realização dos ensaios de fadiga por compressão diametral.

#### 4.4 MÓDULO DE RESILIÊNCIA

Os ensaios de Módulo de Resiliência, normalmente utilizado como parâmetro de deformabilidade na análise de tensão/deformação das estruturas de pavimentos, foram realizados de acordo com a NBR 16018/2011.

A Tabela 22 apresenta os valores de MR encontrados para os seis tipos de misturas estudadas.

Tabela 22: Resultados obtidos de Módulo de Resiliência

<b>Mistura</b>	<b>Média</b>	<b>Desvio Padrão</b>	<b>Coef. de variação %</b>
Ref 50/70	6415	1901	30
Ref 60/85	5360	133	2
CC 50/70	8643	245	3
CC 60/85	3600	417	12
CD 50/70	8986	915	10
CD 60/85	6237	53	1

Quando incorporada cal do tipo dolomítica ocorreu um aumento de MR em relação às misturas de Referência (sem cal) independentemente do tipo de ligante, embora com aumento mais significativo nas misturas elaboradas com ligante convencional (aumento de 40% para a mistura de cal dolomítica com ligante convencional em relação à mistura referência de ligante convencional sem cal e de 16% para a mistura de cal dolomítica com ligante modificado em relação à referência de ligante modificado sem cal).

Com a adição de cal do tipo calcítica à mistura com ligante convencional registrou-se um aumento do módulo de resiliência de aproximadamente 35% em relação à mistura referência elaborada com ligante convencional e sem cal, contudo o mesmo não se observou quando incorporada cal calcítica ao ligante modificado que, apresentou uma redução no valor de módulo de 32% em relação à referência sem cal.

Na Figura 36 estão representados graficamente os valores dos módulos de resiliência obtidos para as seis misturas estudadas.



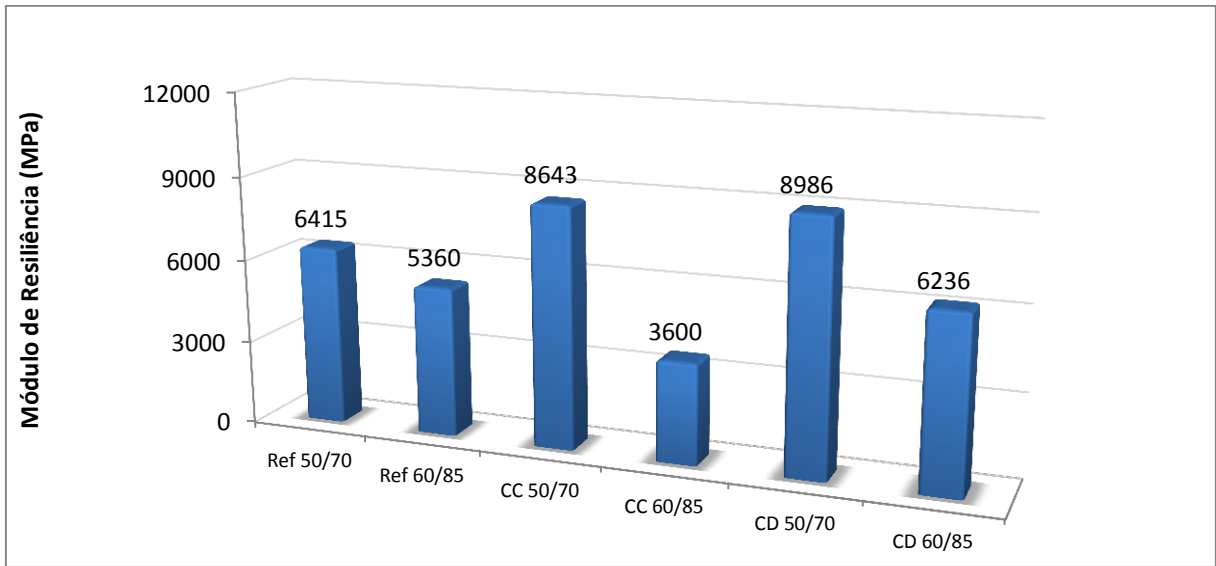


Figura 36: Módulo de Resiliência das seis misturas analisadas

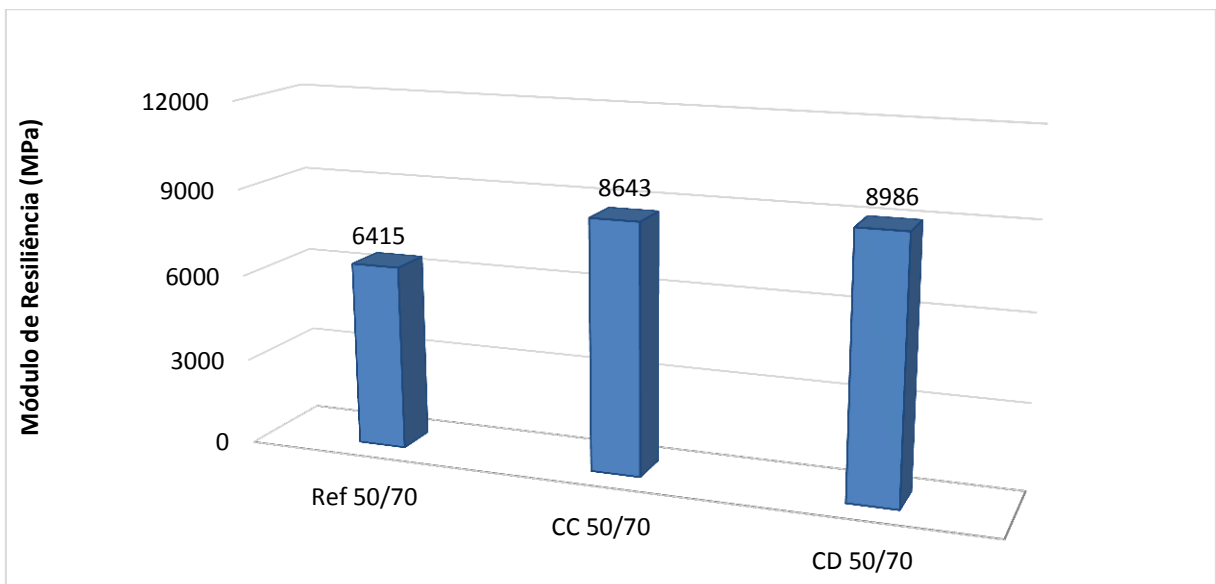


Figura 37: Módulo de Resiliência das três misturas elaboradas com Ligante Convencional



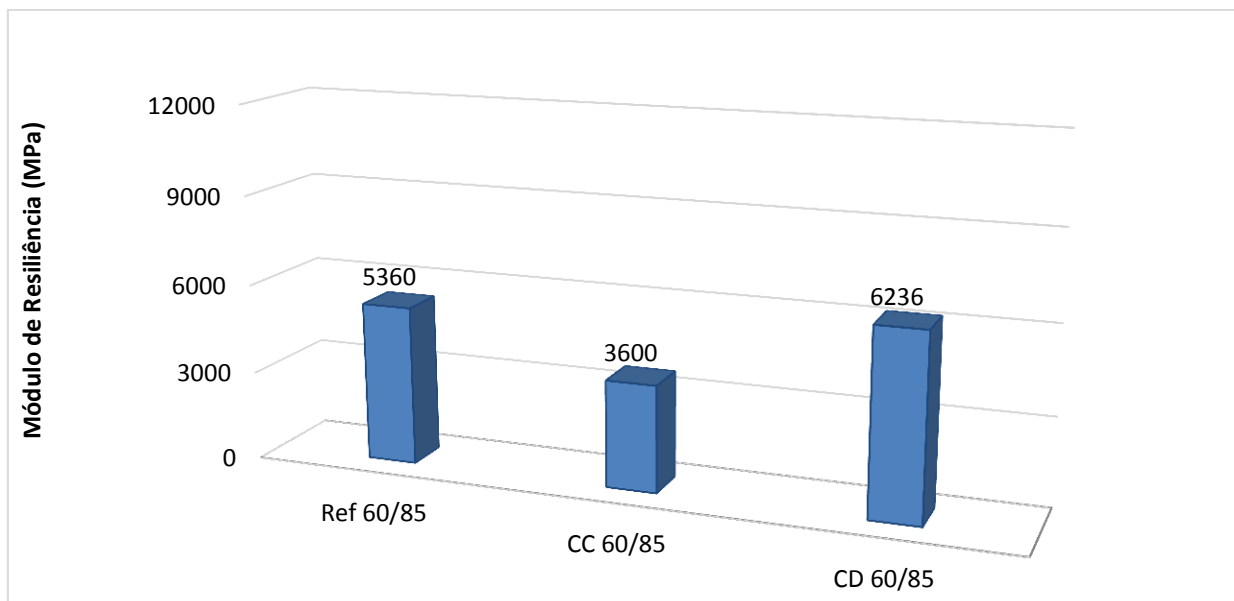


Figura 38: Módulo de Resiliência das três misturas elaboradas com Ligante Modificado

De forma geral, obteve-se elevados valores de MR, especialmente para as misturas confeccionadas com ligante convencional, e mais pronunciada quando adicionada cal à mistura, provavelmente dado pela influência da incorporação da cal, aumentando a rigidez da mistura.

Os Módulos de Resiliência das misturas asfálticas elaboradas com ligante modificado, como era esperado, resultaram em menores valores do que os MR das misturas confeccionadas com ligante convencional.

Quando comparadas as misturas de referências (ligante convencional e modificado sem adição de cal), o valor do Módulo de Resiliência da mistura elaborada com ligante convencional foi 16% superior ao valor de MR da mistura elaborada com ligante modificado.

Quando incorporada cal calcária à mistura com ligante convencional, o aumento no valor do módulo foi de 34% em relação à mistura sem cal e ligante convencional. Quando adicionada cal dolomítica, este aumento representou aproximadamente 40% em relação à referência (sem cal com ligante convencional).

Para as misturas preparadas com ligante modificado, o valor do módulo de resiliência teve uma redução de 32% em relação à mistura sem cal e ligante modificado e um aumento de módulo de 16% quando incorporada cal dolomítica em relação à mistura sem cal.

#### 4.5 ANÁLISE DO MÓDULO DE RESILIÊNCIA E DA RESISTÊNCIA À TRAÇÃO

Para que se possa ter em um pavimento, uma adequada distribuição de tensões, bem como deformações compatíveis com as características de deformabilidade dos materiais que o constituem, é fundamental a compatibilização das rigidezes entre estas camadas.

Conforme mencionado por De Cezaro Junior (2008), através da relação entre o Módulo de Resiliência e a Resistência à Tração (MR/RT), é possível obter um indicativo da compatibilidade entre a rigidez da mistura e sua resistência. Misturas asfálticas muito rígidas, com Módulos de Resiliência elevados requerem altos valores de Resistência à Tração em função da concentração de esforços no seu interior.

Apresenta-se a seguir, através da Tabela 23, os valores calculados para estas relações para as seis misturas estudadas. A Figura 39 representa graficamente os resultados obtidos.

Tabela 23: MR e RT a 25° das seis misturas asfálticas estudadas

<b>Tipo da Mistura</b>	<b>MR (MPa)</b>	<b>RT (MPa)</b>	<b>MR/RT</b>
Ref 50/70	6415	1,15	5578
Ref 60/85	5360	1,48	3622
CC 50/70	8643	1,21	7143
CC 60/85	3600	1,26	2857
CD 50/70	8986	1,30	6912
CD 60/85	6236	1,73	3605

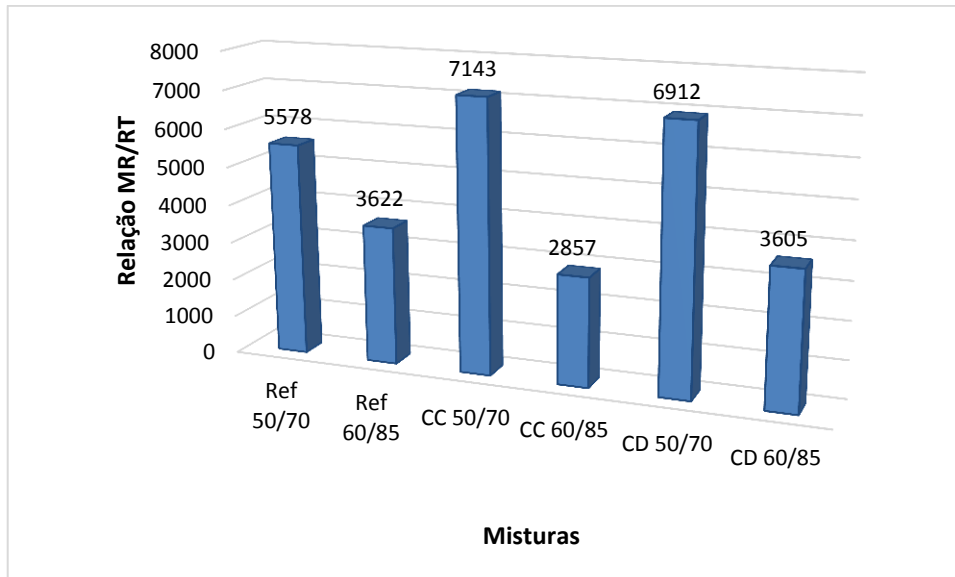


Figura 39: Relação MR/RT das seis misturas estudadas

Considerando que engloba informações sobre a rigidez e a resistência da mistura, é mais desejável um valor pequeno dessa razão, buscando-se baixa rigidez para evitar elevada absorção de tensões que levem ao trincamento prematuro do revestimento, e alta resistência à tração, uma vez que em geral uma maior resistência na ruptura é também associada a uma maior resistência à fadiga (CERATTI et al., 2008).

A relação entre os parâmetros de Módulo de Resiliência e Resistência à Tração era antigamente utilizada como indicador da vida de fadiga entre as misturas, sendo mais utilizada quando se desejava fazer uma análise comparativa entre tipos de ligantes. Diversos autores, como por exemplo Medina e Motta, sugerem que a relação MR/RT deve ter seu valor entre 2.500 a 4.000 para que o pavimento apresente um bom comportamento quanto à fadiga.

Contudo, a utilização desse parâmetro é apenas uma simplificação do comportamento esperado no que se refere à resistência à fadiga, sendo necessária a realização de ensaios de fadiga onde se pode obter resultados de maior confiabilidade.

Pode-se concluir então através da Figura 39 que os melhores desempenhos no que se refere à fadiga, considerando a razão MR/RT, foram obtidos para as misturas elaboradas com ligante modificado (AMP CAP 60/85) e entre essas misturas, a elaborada com cal calcítica apresentou resultado mais satisfatório por ter apresentado o menor valor de relação MR/RT.

## 4.6 VIDA DE FADIGA

Para determinar a Vida de Fadiga das seis misturas asfálticas que englobam esta pesquisa, foi aplicado o mesmo sistema de carregamento utilizado para o ensaio de Módulo de Resiliência, submetendo os corpos de prova a níveis de tensão de 30%, 40% e 50% do valor da Tensão de Tração até a ruptura. A temperatura do ensaio foi de 25° C.

A vida de Fadiga em laboratório das misturas estudadas foi modelada em função da Diferença de Tensões ( $\Delta\sigma$ ), no centro do corpo de prova, da Tensão de Tração ( $\sigma$ ) e Deformação resiliente específica inicial ( $\epsilon_i$ ), conforme resultados apresentados a seguir.

### 4.6.1 Vida de Fadiga em Função da Diferença de Tensões ( $\Delta\sigma$ )

A Vida de Fadiga neste modelo é expressa em função da diferença algébrica entre tensões horizontal (de tração) e vertical (de compressão) no centro de cada amostra. Pinto e Preussler (2002) mostram que  $\Delta\sigma = 4 \sigma$ .

São apresentados na Tabela 24 os modelos obtidos onde “ $k_1$ ” e “ $n_1$ ” são os parâmetros do modelo e  $R^2$  o coeficiente de determinação do modelo. Na Figura 40, são mostradas as curvas de Fadiga das misturas estudadas.

Tabela 24: Valores dos Parâmetros do Modelo “ $k_1$ ” e “ $n_1$ ”

Tipo da Mistura	Modelo	Parâmetro “ $k_1$ ”	Parâmetro “ $n_1$ ”	$R^2$
Ref 50/70	$Nf=5787(1/\Delta\sigma)^{3,55}$	5787	3,55	0,98
Ref 60/85	$Nf=6318(1/\Delta\sigma)^{3,45}$	6318	3,45	0,97
CC 50/70	$Nf=4649(1/\Delta\sigma)^{3,87}$	4649	3,87	0,93
CC 60/85	$Nf=15570(1/\Delta\sigma)^{4,20}$	15570	4,20	0,96
CD 50/70	$Nf=1337(1/\Delta\sigma)^{3,39}$	1337	3,39	0,98
CD 60/85	$Nf=11156(1/\Delta\sigma)^{4,21}$	11156	4,21	0,93

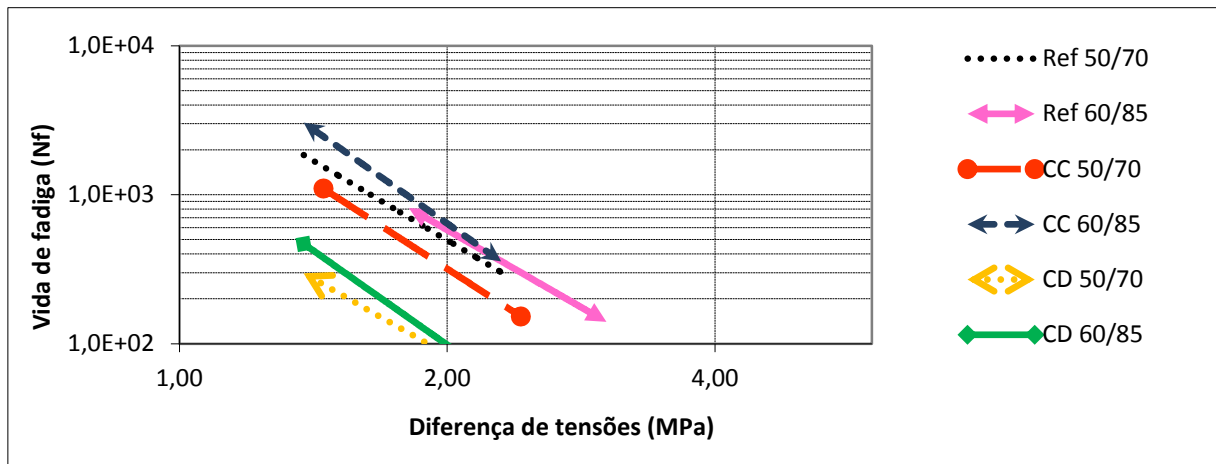


Figura 40: Vida de Fadiga em função da Diferença de tensões para as seis misturas estudadas

#### 4.6.2 Vida de Fadiga em Função da Tensão de Tração

A Vida de Fadiga das misturas asfálticas, também foi modelada em função da tensão de tração aplicada.

São apresentados na Tabela 25 os modelos obtidos, onde “ $k_2$ ” e “ $n_2$ ” são os parâmetros do modelo e  $R^2$  o coeficiente de determinação do modelo. Ainda na Figura 41, são apresentadas as curvas de Fadiga das misturas estudadas.

Tabela 25: Valores dos Parâmetros do Modelo “k<sub>2</sub>” e “n<sub>2</sub>”

Tipo da Mistura	Modelo	Parâmetro “k <sub>2</sub> ”	Parâmetro “n <sub>2</sub> ”	R <sup>2</sup>
Ref 50/70	$N_f = 42,42(1/\sigma_t)^{3,55}$	42,42	3,55	0,98
Ref 60/85	$N_f = 53,13(1/\sigma_t)^{3,45}$	53,13	3,45	0,97
CC 50/70	$N_f = 21,76(1/\sigma_t)^{3,87}$	21,76	3,87	0,93
CC 60/85	$N_f = 46,35(1/\sigma_t)^{4,20}$	46,35	4,20	0,96
CD 50/70	$N_f = 12,19(1/\sigma_t)^{3,39}$	12,19	3,39	0,98
CD 60/85	$N_f = 32,53(1/\sigma_t)^{4,21}$	32,53	4,21	0,93

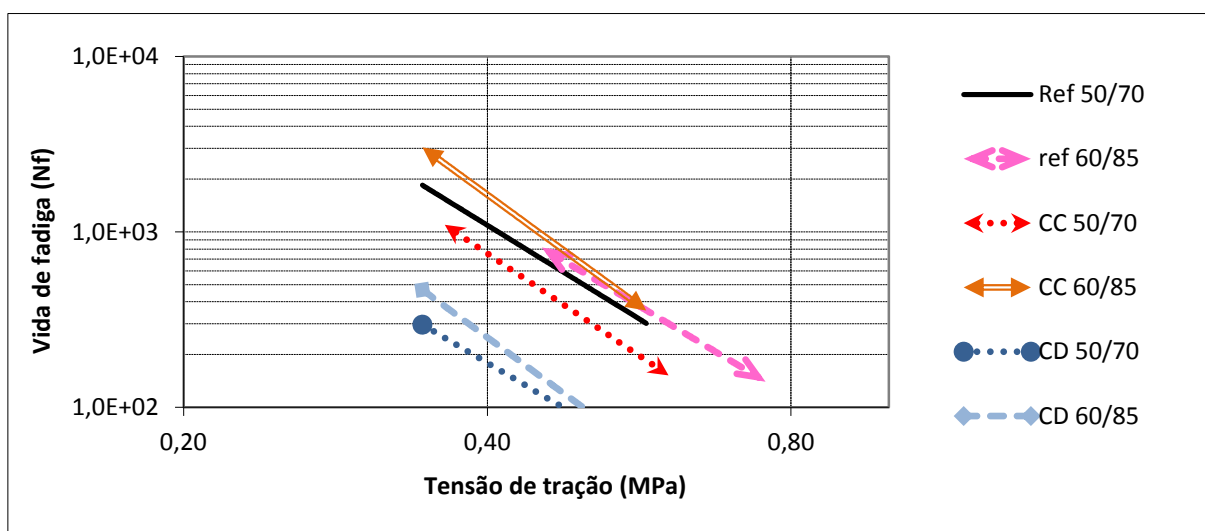


Figura 41: Vida de Fadiga em função da Tensão de Tração para as seis misturas estudadas

#### 4.6.3 Vida de Fadiga em Função da Deformação Específica Inicial

Neste tipo de modelo, a Vida de Fadiga das misturas avaliadas em laboratório é em função da deformação específica inicial, que depende da carga aplicada e do módulo de Resiliência da mistura.

São apresentados na Tabela 26 os modelos obtidos, onde “k<sub>3</sub>” e “n<sub>3</sub>” são os parâmetros do modelo e R<sup>2</sup> o coeficiente de determinação do modelo. Ainda na Figura 42, são apresentadas

as curvas de Fadiga das misturas estudadas. Ressaltada ainda que  $\epsilon_i$  é a deformação específica inicial em cm/cm.

Tabela 26: Valores dos Parâmetros do Modelo “ $k_3$ ” e “ $n_3$ ”

Tipo da Mistura	Modelo	Parâmetro “ $k_3$ ”	Parâmetro “ $n_3$ ”	$R^2$
Ref 50/70	$Nf=2,28 \cdot 10^{-9}(1/\epsilon_i)^{2,85}$	$2,28 \cdot 10^{-9}$	2,85	0,79
Ref 60/85	$Nf=2,13 \cdot 10^{-3}(1/\epsilon_i)^{1,49}$	$2,13 \cdot 10^{-3}$	1,49	0,77
CC 50/70	$Nf=3,00 \cdot 10^{-5}(1/\epsilon_i)^{1,85}$	$3,00 \cdot 10^{-5}$	1,85	0,70
CC 60/85	$Nf=9,00 \cdot 10^{-11}(1/\epsilon_i)^{3,42}$	$9,00 \cdot 10^{-11}$	3,42	0,94
CD 50/70	$Nf=2,97 \cdot 10^{-2}(1/\epsilon_i)^{1,02}$	$2,97 \cdot 10^{-2}$	1,02	0,79
CD 60/85	$Nf=1,85 \cdot 10^{-4}(1/\epsilon_i)^{1,72}$	$1,85 \cdot 10^{-4}$	1,72	0,87

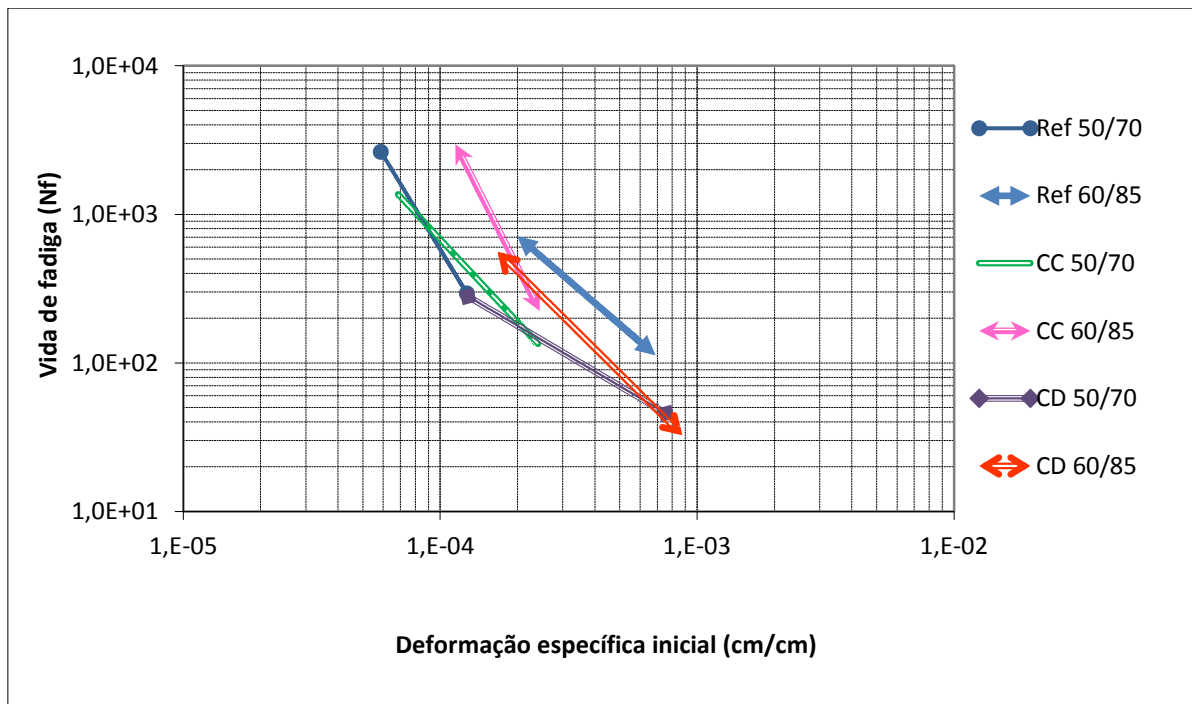


Figura 42: Vida de Fadiga em função da Deformação específica inicial para as seis misturas estudadas

#### 4.7 RESISTÊNCIA AO DANO POR UMIDADE INDUZIDA (AASHTO T 283-89)

A avaliação do dano nas misturas asfálticas, causados pela ação da umidade é fundamental, considerando que afeta diretamente o desempenho e a vida de serviço dos pavimentos asfálticos, evidenciando possíveis problemas de adesividade entre o ligante e o agregado.

Cabe ressaltar que nesta pesquisa foi utilizado um aditivo melhorador de adesividade, conforme anteriormente descrito no Capítulo 3.

Nesta pesquisa buscou-se avaliar a influência da adição de cal e do tipo de ligante com agregado granítico em relação à Resistência ao dano por umidade induzida. A Tabela 27 apresenta os resultados obtidos no ensaio AASHTO T 283-89, com os valores da Resistência à Tração por Compressão Diametral das amostras (média de três corpos de prova) com e sem condicionamento, bem como a Resistência Retida à Tração.

Tabela 27: Resultados gerais dos ensaios de dano por umidade induzida (AASHTO T 283-89)

<b>Tipo da Mistura</b>	<b>Média Volume de Vazios (%)</b>	<b>Rt<sub>1</sub> (MPa)</b>	<b>Coef. Variação</b>	<b>Rt<sub>2</sub> (MPa)</b>	<b>Coef. Variação</b>	<b>RRt (%)</b>
Ref 50/70	6,5	1,04	0,04	0,71	0,08	68
Ref 60/85	7,3	0,78	0,04	0,75	0,19	97
CC 50/70	6,5	0,68	0,15	0,52	0,09	76
CC 60/85	7,1	0,85	0,08	0,79	0,08	93
CD 50/70	7,3	0,75	0,11	0,43	0,02	57
CD 60/85	6,8	0,82	0,13	0,81	0,16	99

Na Figura 43 são apresentados os resultados dos ensaios de Resistência à Tração e, na Figura 44 são apresentadas de forma gráfica a Resistência Retida à Tração das seis misturas.



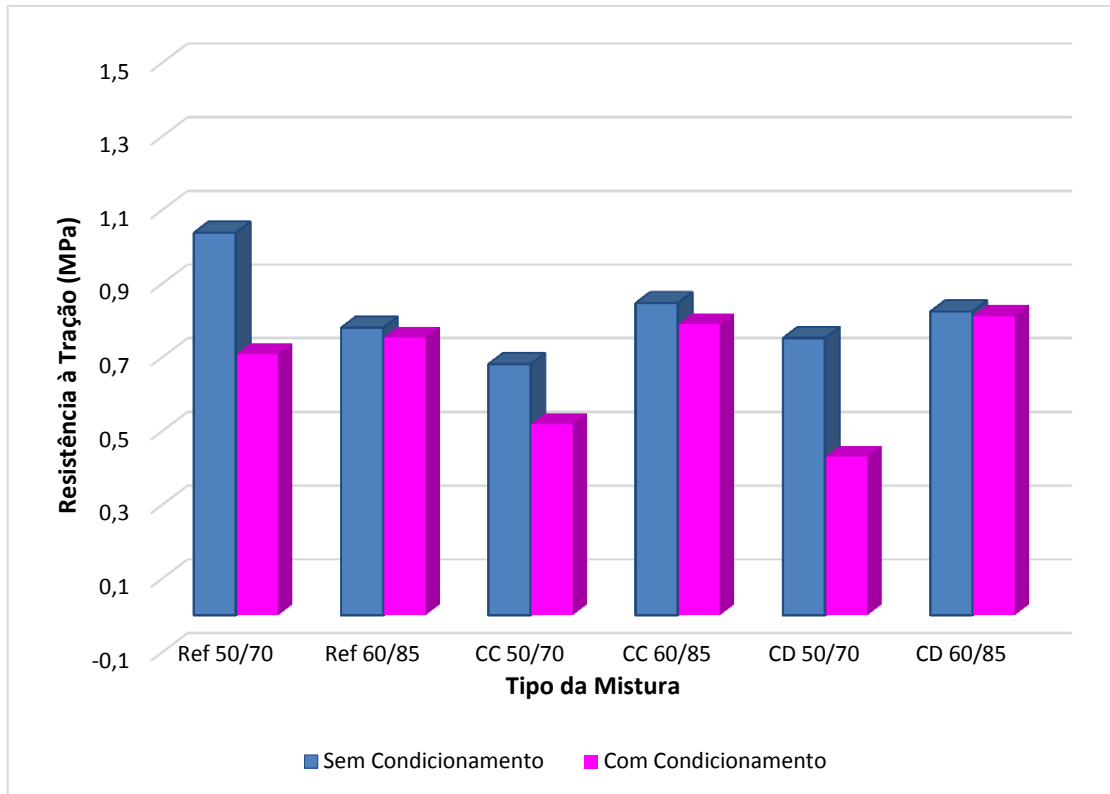


Figura 43: Resultados dos ensaios de Resistência à Tração (AASHTO T 283-89)

Conforme relatado por FURLAN (2006), o valor empregado como critério de definição da suscetibilidade de uma mistura, segundo preconizado pela AASHTO T283/89 é de  $RR_t \geq 70\%$ . Já na Norma AASHTO T283/99, incluída na metodologia SUPERPAVE o critério é de  $RR_t \geq 80\%$ . Segundo Hicks (1991) *apud* Specht (2004), o valor mínimo considerado como bom indicador de boa resistência ao efeito deletério da água é de 70%, adotado também como referência nesta pesquisa.

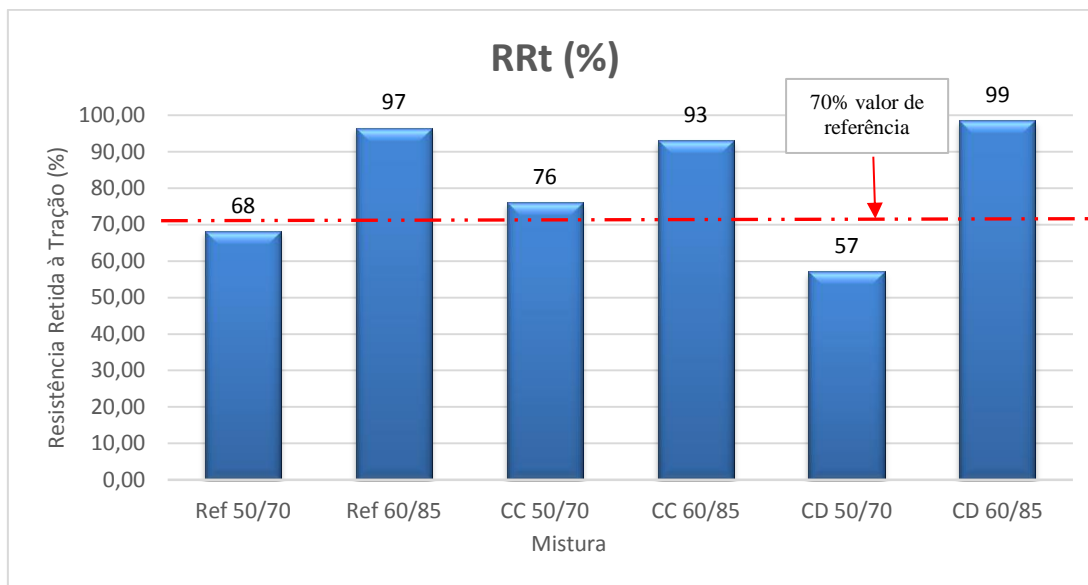


Figura 44: Resultados dos ensaios de Resistência Retida à Tração (AASHTO T 283-89)

Considerando as seis misturas estudadas, os fatores determinantes para o desempenho das misturas no ensaio AASHTO T 283-89 são o tipo de ligante empregado, a adição e o tipo de cal incorporada, já que o agregado, a faixa granulométrica e os demais condicionantes foram mantidas.

Pelos dados obtidos, pode-se observar que as misturas elaboradas com ligante modificado por polímero apresentaram resultados de RRt bem superiores ao valor de referência adotado, considerando ainda que para todas as misturas foi adicionado um DOPE (aditivo melhorador de adesividade). Além disso, quando comparados aos valores de RRt obtidos com ligante convencional, percebe-se um significativo aumento dos valores de RRt das misturas elaboradas com ligante modificado (40% superior nas misturas sem cal; 22% nas misturas elaboradas com cal calcítica e 73% nas misturas elaboradas com cal dolomítica).

Quanto à adição da cal, não se pode afirmar que conferiram as misturas estudadas um melhor desempenho para este ensaio, já que com a adição de cal dolomítica ao ligante convencional CAP 50/70, houve uma diminuição no valor da RRt, e o mesmo pode ser observado para a adição de cal calcítica ao ligante modificado por polímero (AMP CAP 60/85), mas esta última mistura tem valor de RRt também elevada (93%), ou seja, é pouco suscetível ao dano por umidade induzida.

## 5 ANÁLISE PARAMÉTRICA DE PAVIMENTOS CONSTITUÍDOS PELAS MISTURAS ESTUDADAS

Nos itens 4.6.1, 4.6.2 e 4.6.3, foram apresentadas as diversas curvas de fadiga das misturas estudadas. Contudo, conforme já relatado por Specht (2004), fazer uma análise direta, considerando somente as curvas de fadiga ou os modelos, podem levar a conclusões equivocadas do desempenho em serviço quanto ao comportamento de resistência à fadiga. Isso ocorre, pois, o estado de tensões gerado em cada situação depende da estrutura e dos módulos de resiliências das camadas constituintes dos pavimentos.

Neste capítulo, portanto, são apresentados os resultados obtidos através de uma análise paramétrica. As estruturas de pavimento adotadas para esta análise consistem de camadas de revestimento asfáltico e de substratos formados por uma base granular e subleito, e a espessura, módulos de resiliência e coeficiente de Poisson são demonstrados na Tabela 28 e ilustrados através da Figura 45.

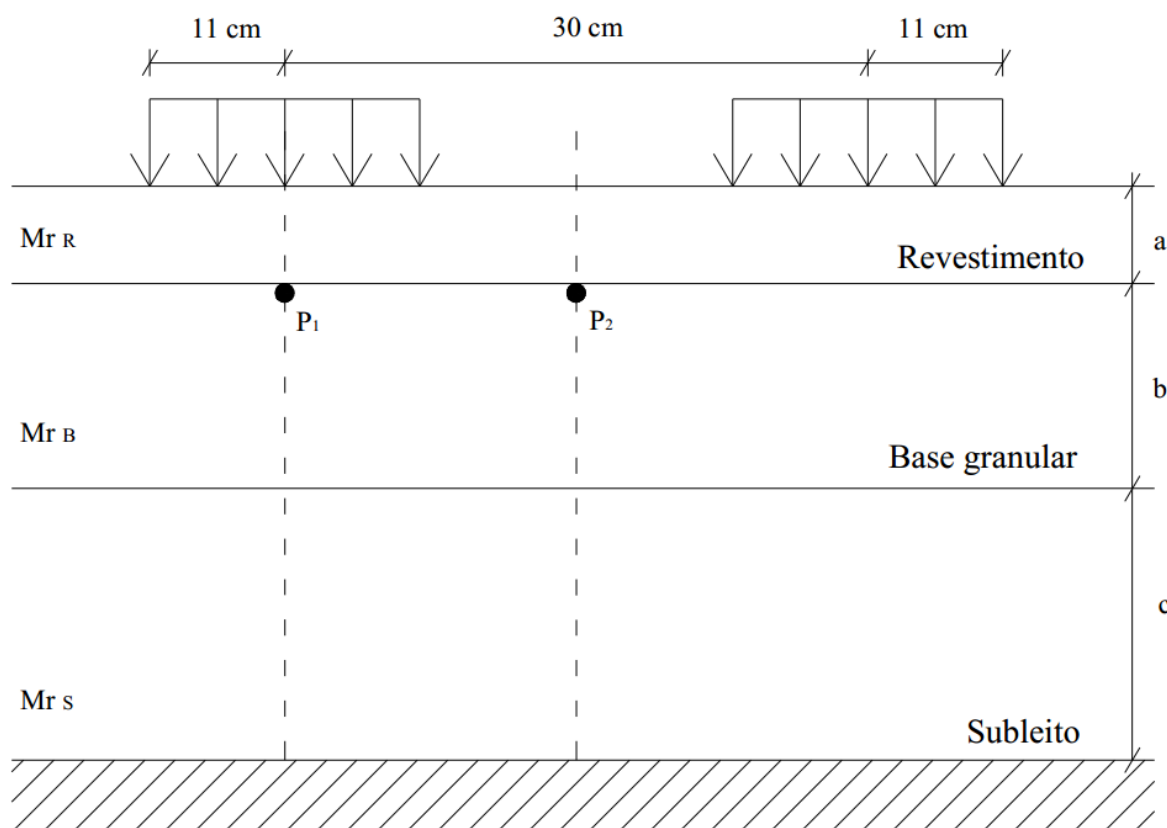


Figura 45: Esquema genérico da estrutura analisada

Tabela 28: Características estruturais dos pavimentos analisados

Camada	Espessuras (cm)	Coefficiente de Poisson	Módulo de Resiliência
Revestimento Betuminoso	5,10,15 e 20	0,30	Variável
Base Granular	30	0,35	Variável
Subleito	-	0,45	100

Foi utilizado o programa computacional chamado EVERSTRESS 5.0, desenvolvido pelo Departamento de Transportes de Washington (*Washington State Department of Transportation*). Através desse software é possível determinar as tensões, deformações e deslocamentos de um sistema de camadas elásticas. O programa permite a entrada de parâmetros dos modelos dos materiais, considerando a variação do módulo de resiliência com o estado de tensões atuante nas espessuras das camadas asfálticas.

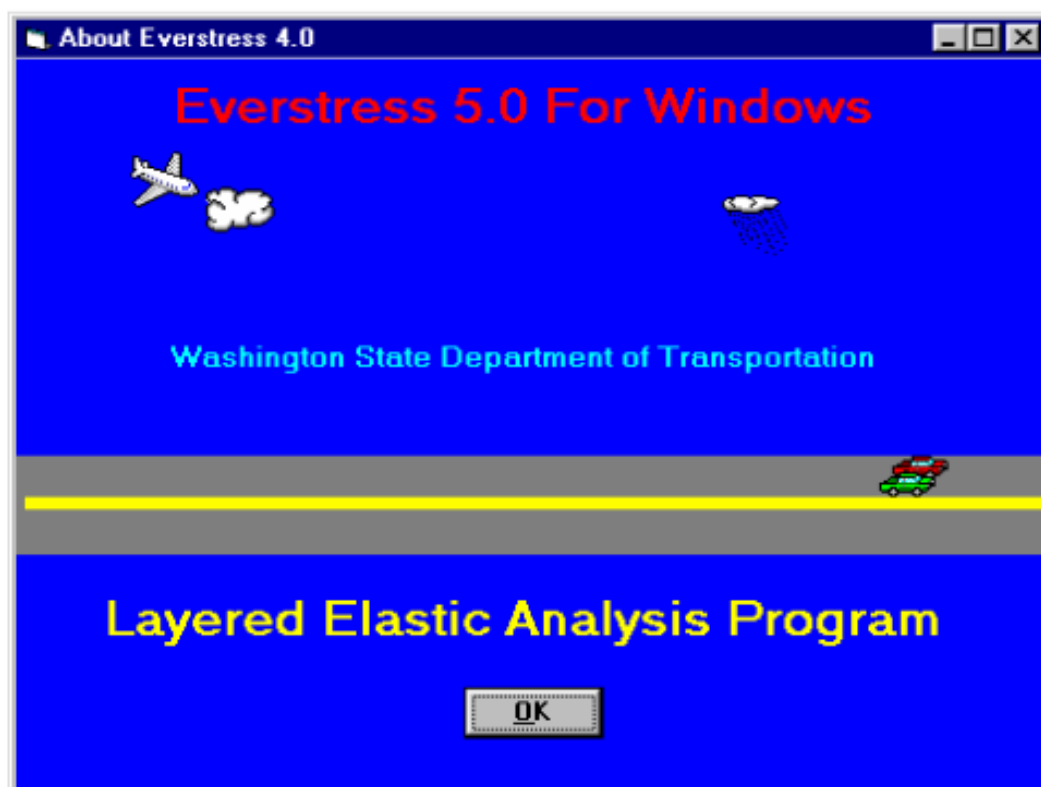


Figura 46: Tela inicial do Software EVERSTRESS 5.0

**Load & Evaluation Points**

No of Loads:       No of X-Y Evaluation Points:

**Load Information**

X-Position (cm):	<input type="text" value="0.00"/>	<input type="text" value="30.00"/>
Y-Position (cm):	<input type="text" value="0.00"/>	<input type="text" value="0.00"/>
Load (N):	<input type="text" value="20500.0"/>	<input type="text" value="20500.0"/>
Pressure (kPa):	<input type="text" value="560.0"/>	<input type="text" value="560.0"/>
Radius (cm):	<input type="text" value="10.79"/>	<input type="text" value="10.79"/>

**Evaluation Points**

X-Position (cm):	<input type="text" value="0.00"/>	<input type="text" value="15.00"/>
Y-Position (cm):	<input type="text" value="0.00"/>	<input type="text" value="0.00"/>
Z-Position (cm):	<input type="text" value="4.999"/>	<input type="text" value="4.999"/>
Z-Position (cm):	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Z-Position (cm):	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Z-Position (cm):	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Z-Position (cm):	<input type="text"/>	<input type="text"/>

Figura 47: Tela do software com os dados de carregamento e pontos de avaliação

**Everstress© Data Entry - C:\EVERSERS\EVERSTRS\TATIANI1.DAT**

File Help

Title:

No of Layers:       Units:  Metric     US Units

**Layer Information**

No	Layer ID	Interface Contact	Poisson's Ratio	Thickness [cm]	Modulus [MPa]	Multiplier [MPa]	Power
<input type="text" value="1"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="1.00"/>	<input type="text" value="0.30"/>	<input type="text" value="5.00"/>	<input type="text" value="6415.00"/>		
<input type="text" value="2"/>	<input type="text" value="1"/>	<input type="text" value="1.00"/>	<input type="text" value="0.35"/>	<input type="text" value="30.00"/>	<input type="text" value="217.00"/>	<input type="text" value="200.00"/>	<input type="text" value="0.640"/>
<input type="text" value="3"/>	<input type="text" value="0"/>		<input type="text" value="0.45"/>		<input type="text" value="100.00"/>		

Max. Iteration:       Moduli Tol.:

Figura 48: Tela do software com dados de entrada (módulo de resiliência, coeficiente de Poisson e espessura das camadas)

Conforme apresentado na Figura 49, foi utilizado um carregamento de eixo simples de rodas duplas, com 8,2 tf (82 kN). Foi considerada a aplicação de meia seção de carregamento através de dois pneus com carga de 20,5 kN cada e pressão de contato de 0,56 MPa (5,6 kgf/cm<sup>2</sup>). A análise foi realizada diretamente abaixo de um pneu e no ponto central entre os pneus. Em relação à profundidade, a análise foi realizada na fibra inferior do revestimento asfáltico.

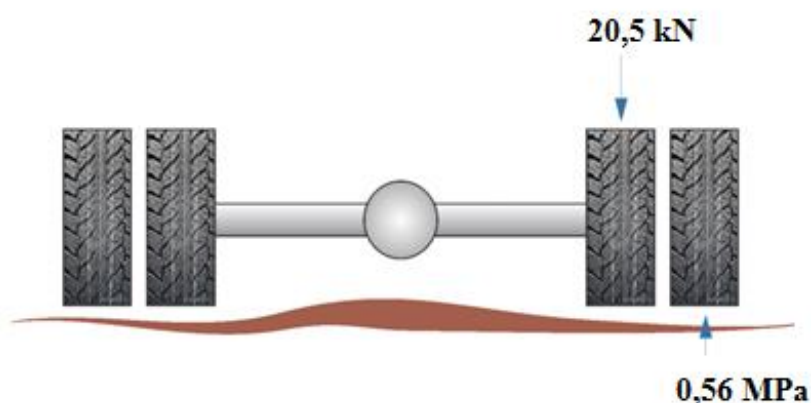


Figura 49: Esquema do carregamento utilizado

Os valores obtidos através do software foram aplicados no modelo de fadiga em função da deformação específica inicial, determinado em laboratório.

Com os resultados alcançados, foi elaborada a Tabela 29, contemplando todas as simulações realizadas, demonstrando os valores de Vida de Fadiga atingidos quando utilizado o modelo obtido por ensaio de laboratório, em função da deformação específica inicial, usualmente utilizada para determinação da Vida de Fadiga.

Tabela 29: Valores de deformações obtidos nas simulações e respectivas Vidas de Fadiga

Tipo da Mistura	Caso	Espessura revestimento (cm)	Espessura Base (cm)	Módulo de Resiliência da mistura (MPa)	Módulo de Resiliência da base granular (MPa)	$\epsilon_i = (10^{-6} \text{ cm/cm})$	Nf
Ref 50/70	1	5	30	6415	217	279	31
	2	10	30	6415	162	206	74
	3	15	30	6415	136	142	214
	4	20	30	6415	118	100	576
Ref 60/85	1	5	30	5360	220	293	392
	2	10	30	5360	162	226	575
	3	15	30	5360	136	160	968
	4	20	30	5360	118	114	1597
CC 50/70	1	5	30	8643	211	253	134
	2	10	30	8643	155	175	264
	3	15	30	8643	127	116	563
	4	20	30	8643	113	81	1107
CC 60/85	1	5	30	3600	230	318	87
	2	10	30	3600	174	272	147
	3	15	30	3600	143	203	405
	4	20	30	3600	125	149	1160
CD 50/70	1	5	30	8986	210	249	141
	2	10	30	8986	154	171	206
	3	15	30	8986	127	113	314
	4	20	30	8986	110	79	457
CD 60/85	1	5	30	6236	220	281	237
	2	10	30	6236	162	210	393
	3	15	30	6236	136	145	742
	4	20	30	6236	118	103	1345

Considerando os diversos fatores que influenciam a Vida de Fadiga das misturas asfálticas, se faz necessária a utilização de um fator laboratório-campo, para que dessa forma se possa estimar a Vida de Fadiga das misturas no campo, que é diferente da Vida de Fadiga obtida em laboratório. O fator campo laboratório foi adotado de acordo com o proposto por Pinto e Preussler:

$$N_{\text{campo}} = 10^5 * N_L$$

Onde:

$N_{\text{campo}}$  = número equivalente de operação do eixo padrão até o trincamento significativo por fadiga.

$N_L$  = número de carregamentos estimados em laboratório com emprego dos modelos de fadiga

Nas Figuras 50 e 51 apresentam-se graficamente os resultados da análise paramétrica, onde observa-se que o melhor comportamento à fadiga, para qualquer espessura de camadas asfálticas entre 5 e 20 cm, é obtido pela mistura elaborada com ligante polimerizado, sem a incorporação de cal.

Já o pior comportamento foi apresentado pela mistura elaborada com ligante convencional sem incorporação de cal, sendo que para a camada de 20 cm de revestimento asfáltico a adição da cal dolomítica foi prejudicial à Vida de Fadiga, resultando em um valor inferior até mesmo que a mistura referência com ligante convencional.

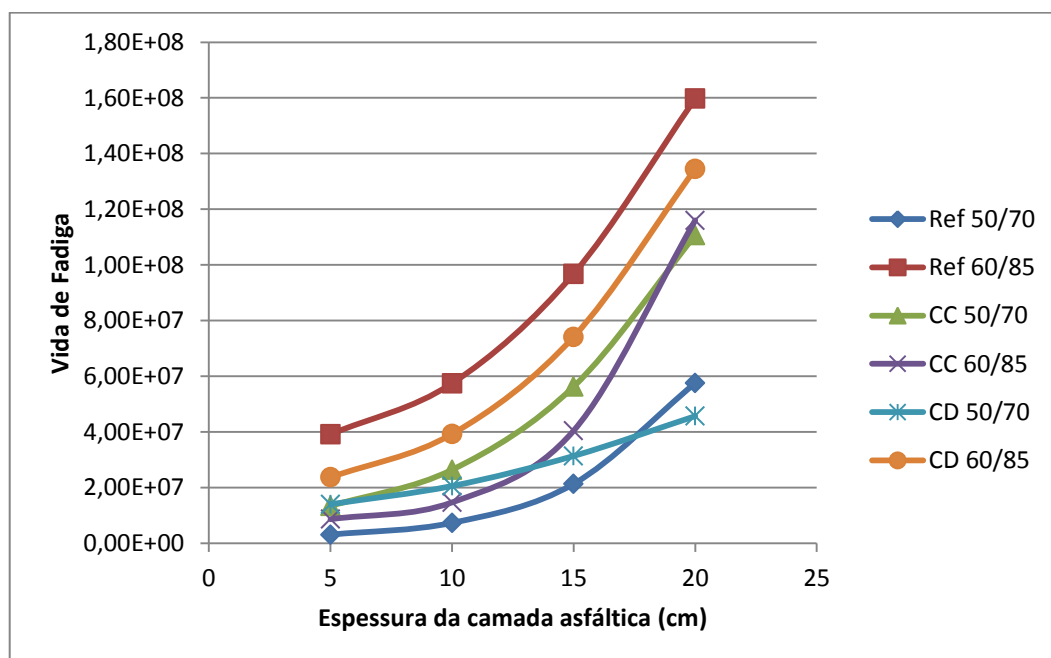


Figura 50: Vida de Fadiga em função da deformação específica inicial considerando diferentes espessuras de camadas asfálticas e os respectivos módulos de resiliência das misturas



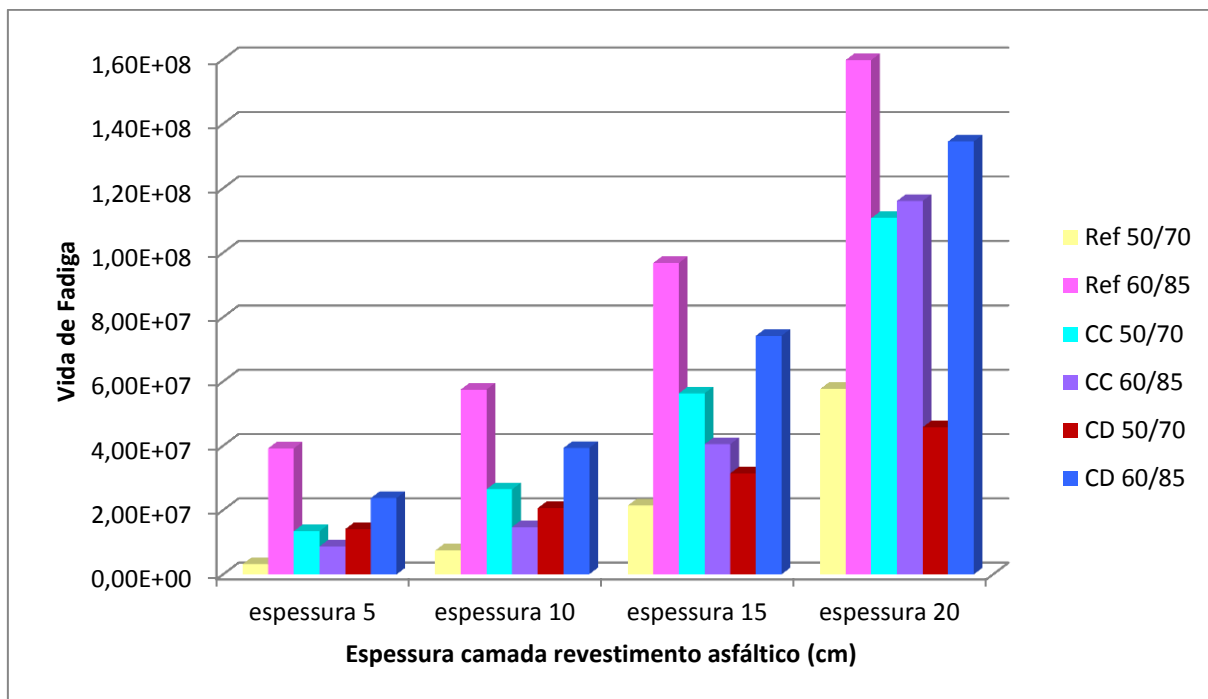


Figura 51: Vida de Fadiga em função da deformação específica inicial com diferentes espessuras de camada asfáltica

Como mostrado na Figura 52, quando a mistura é preparada com ligante convencional (CAP 50/70), a adição da cal dolomítica mostrou-se benéfica para espessuras de camadas asfálticas de até 15 cm. Já a incorporação da cal calcítica resultou em significativo aumento da vida de fadiga para qualquer espessura de camada (entre as camadas consideradas nesta pesquisa).

Adicionando cal calcítica a uma mistura elaborada com ligante convencional, obtém-se maior resistência à fadiga que quando a mesma cal é adicionada à uma mistura elaborada com ligante modificado por polímero.

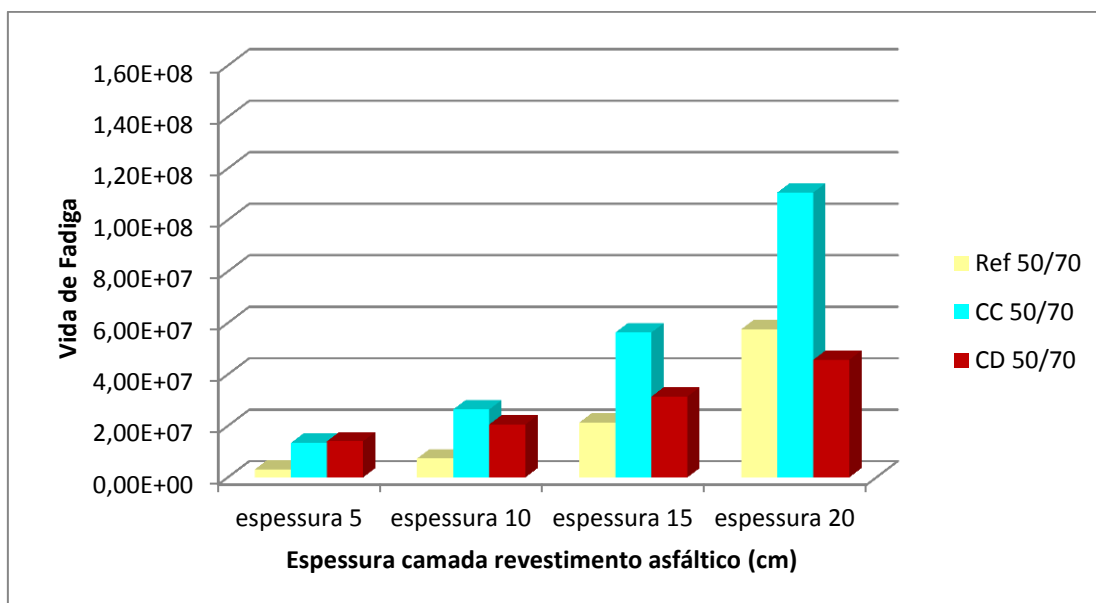


Figura 52: Vida de Fadiga em função da deformação específica inicial com diferentes espessuras de camada asfáltica das misturas elaboradas com ligante convencional

O que se observa quando é empregado o ligante modificado por polímero (AMP CAP 60/85), como observa-se na Figura 53, é que a adição de cales não aumenta, ao contrário reduz a vida de fadiga da camada. A redução da vida de fadiga é ainda mais expressiva quando incorporada cal calcítica à mistura.

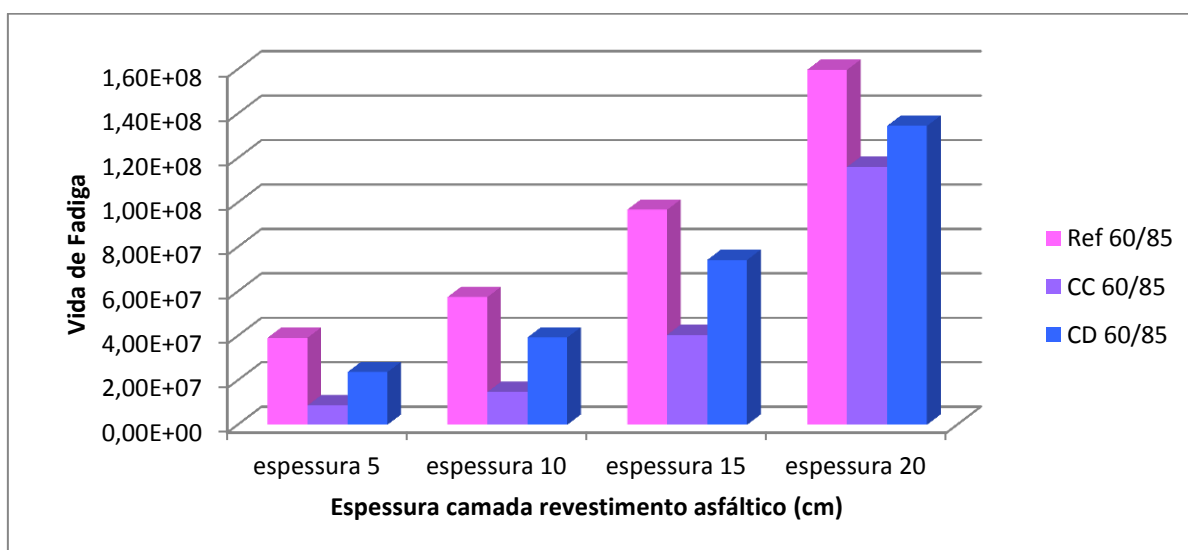


Figura 53: Vida de Fadiga em função da deformação específica inicial com diferentes espessuras de camada asfáltica das misturas elaboradas com ligante modificado

Pela Figura 53, se verifica também que a Vida de Fadiga aumenta substancialmente com o aumento da espessura da camada para todas as misturas estudadas, observando que as misturas de melhor comportamento (Ref 60/85 e CD 60/85) também foram as que apresentaram maiores valores de resistência à Tração e Relação MR/RT na faixa de 3.600.

Na Tabela 30 e na Figura 54, são apresentadas as relações entre as Vidas de Fadiga para cada espessura das seis misturas estudadas em relação à mistura referência elaborada com ligante convencional e sem cal.

Na Figura 55, é possível avaliar melhor as variações promovidas pela incorporação de cales e tipo de ligante utilizado para compor a mistura. Considerando apenas as misturas elaboradas com ligante convencional, a incorporação das cales calcítica e dolomítica promovem um aumento substancial na resistência à fadiga de mais de 300% para camadas de 5 cm. Quando considerada a mudança de ligante de convencional para modificado, sem incorporação de nenhum tipo de cal, para a mesma espessura é possível obter-se um ganho de até 1150% na vida de fadiga.

Tabela 30: Relações entre as Vidas de Fadiga das misturas com ligante convencional/modificado e cales com a Vida de Fadiga da mistura referência (sem cal e ligante convencional)

Tipo da Mistura	Nf da mistura considerada/Nf da mistura Ref 50/70			
	Espessura 5 cm	Espessura 10 cm	Espessura 15 cm	Espessura 20 cm
<b>Ref 60/85</b>	12,6	7,8	4,5	2,8
<b>CC 50/70</b>	4,3	3,6	2,6	1,9
<b>CC 60/85</b>	2,8	1,9	1,9	2,0
<b>CD 50/70</b>	4,5	2,8	1,5	0,8
<b>CD 60/85</b>	7,6	5,3	3,5	2,3

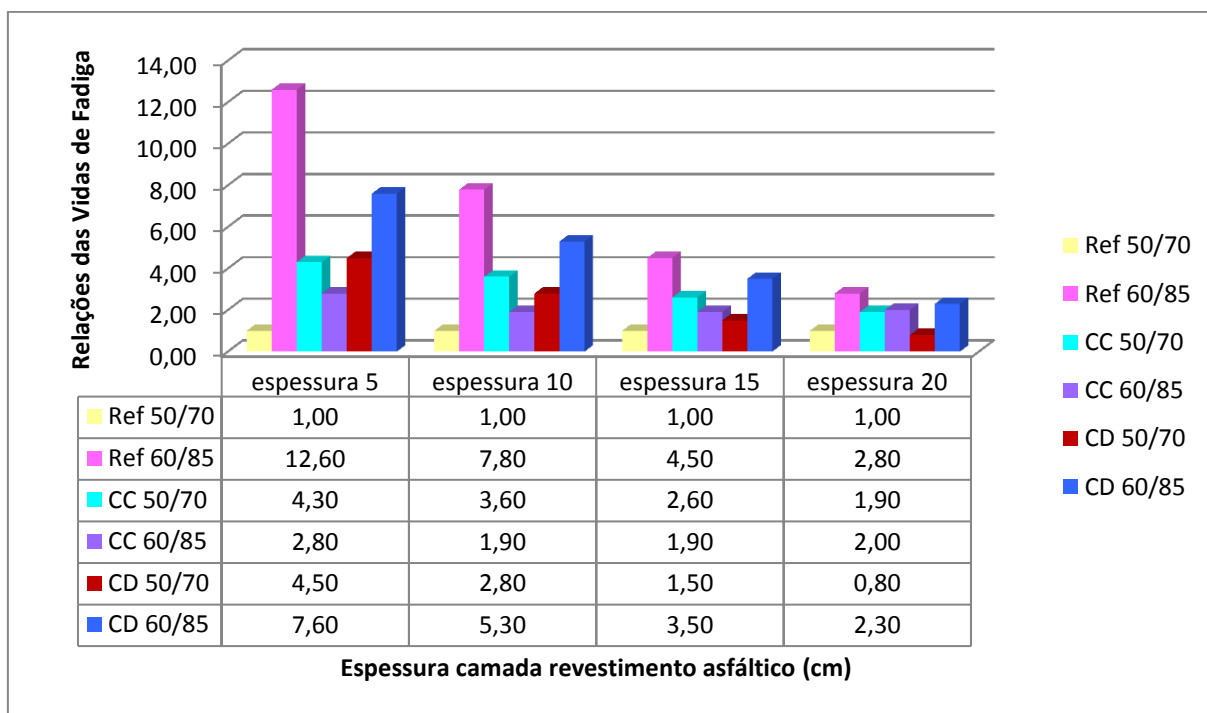


Figura 54: Relações das Vidas de Fadiga das misturas com ligante convencional/modificado e cales com a Vida de Fadiga da mistura referência com ligante convencional (Ref 50/70)

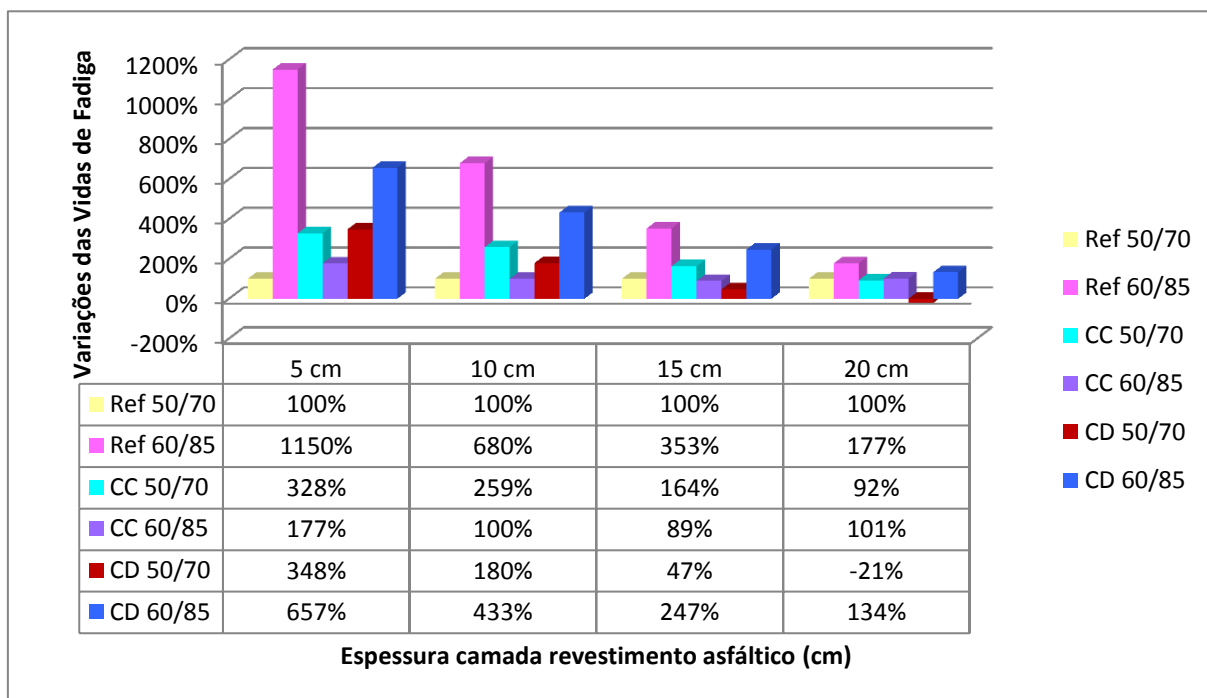


Figura 55: Variações em percentual das Vidas de Fadiga das misturas com ligante convencional/modificado e cales com a Vida de Fadiga da mistura referência com ligante convencional (Ref 50/70)

Para todas as simulações feitas, nas quatro diferentes espessuras de revestimento, a mistura que apresentou desempenho superior às demais misturas foi a elaborada com ligante modificado sem incorporação de cal. A incorporação de cal calcítica nas misturas elaboradas com ligante convencional foi benéfica à Vida de Fadiga para todas as camadas de revestimento. Já quando a mistura foi produzida com cal do tipo dolomítica e ligante convencional, a Vida de Fadiga foi superior do que a encontrada para a mistura elaborada sem cal e com ligante convencional para as camadas de 5, 10 e 15 cm, sendo que para a camada de 20 cm, a incorporação mostrou-se ineficiente, reduzindo a vida de fadiga em 21%.

O desempenho das misturas elaboradas com cal calcítica e dolomítica em relação à mistura de referência elaborada com ligante convencional e sem incorporação de cal pode ser observada através da Tabela 31 e também graficamente através da Figura 56.

Tabela 31: Relações entre as Vidas de Fadiga das misturas com cal calcítica e dolomítica com a Vida de Fadiga da mistura referência elaborada com ligante convencional

Tipo da Mistura	Nf da mistura considerada/Nf da mistura Ref 50/70			
	Espessura 5 cm	Espessura 10 cm	Espessura 15 cm	Espessura 20 cm
<b>CC 50/70</b>	4,3	3,6	2,6	1,9
<b>CD 50/70</b>	4,5	2,8	1,5	0,8

Conforme ilustrado na Figura 56, os resultados das variações das três misturas elaboradas com ligante convencional são apresentados individualizados, e o que se pode perceber é que a incorporação da cal foi muito significativa para a Vida de Fadiga destas misturas, especialmente quando incorporada cal calcítica para todas as espessuras de camada asfáltica.

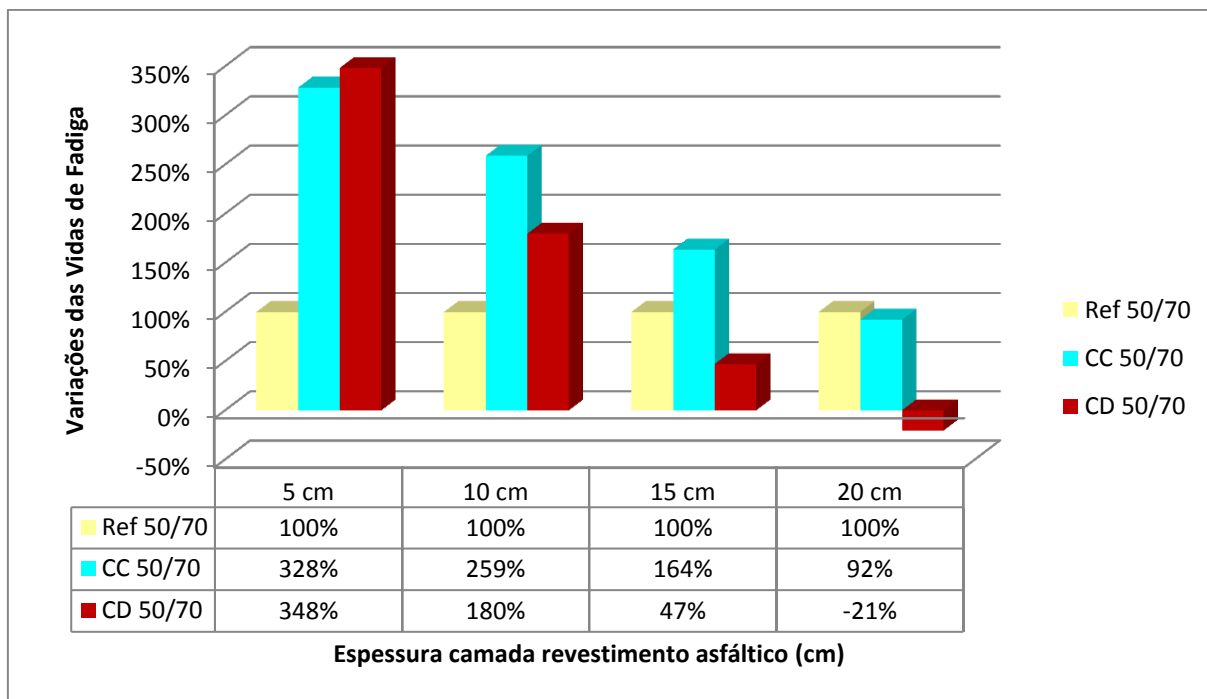


Figura 56: Variações das Vidas de Fadiga das misturas com ligante convencional e cales com a Vida de Fadiga da mistura referência com ligante convencional (Ref 50/70)

Pela Figura 56 é possível quantificar a melhora substancial da Vida de Fadiga quando incorporada cal calcítica e dolomítica à mistura elaborada com CAP 50/70 para as espessuras entre 5 e 15 cm. Considerando a espessura da camada de 15 cm por exemplo, a incorporação de cal calcítica promoveu um aumento de mais de 160%, enquanto que a adição de cal dolomítica promoveu um aumento de vida de fadiga de quase 50%. Para a espessura de 20 cm, a adição de cal calcítica continua se mostrando benéfica, aumentando em 90% a vida de fadiga, enquanto para esta mesma espessura, incorporar cal dolomítica trouxe prejuízo à Vida de Fadiga da mistura de aproximadamente 21%.

Assim como analisado separadamente para as misturas elaboradas com ligante convencional, na Figura 57 estão representados os resultados das variações das três misturas elaboradas com ligante modificado em relação à mistura referência de ligante convencional e sem cal.

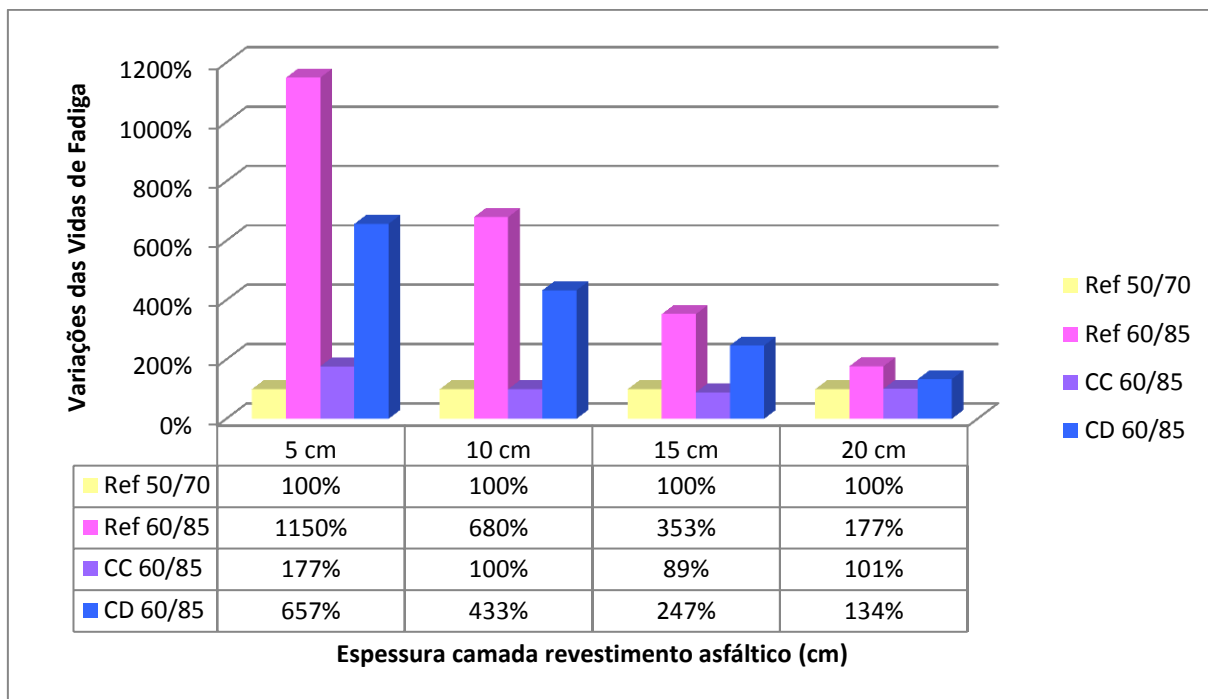


Figura 57: Variações das Vidas de Fadiga em percentual das misturas com ligante modificado com a Vida de Fadiga da mistura referência com ligante convencional (Ref 50/70)

A Vida de Fadiga das misturas elaboradas com ligante modificado por polímero, aumenta quando comparada com a mistura de referência com CAP 50/70 e sem cal, contudo, conforme representado na Figura 58, considerando a mistura de referência elaborada com ligante modificado e sem cal, em todas as espessuras simuladas houve redução de resistência à Fadiga quando foi incorporada cal à mistura, especialmente cal do tipo calcítica, que era esperado que apresentasse os melhores resultados.

Quando incorporada cal calcítica, para as espessuras de 5 e 10 cm, o prejuízo na vida de fadiga pode chegar a quase 80%. Já para a cal dolomítica, essa redução na vida de fadiga fica por volta dos 30%. Ou seja, não se justifica a utilização de cal hidratada quando se emprega o ligante polimerizado utilizado nesta pesquisa.

O desempenho das misturas elaboradas com cal calcítica e dolomítica em relação à mistura de referência elaborada com ligante modificado e sem incorporação de cal pode ser observada na Tabela 32.

Tabela 32: Relações entre as Vidas de Fadiga das misturas com cal calcítica e dolomítica com a Vida de Fadiga da mistura referência elaborada com ligante modificado

Tipo da Mistura	Nf da mistura considerada/Nf da mistura Ref 60/85			
	Espessura 5 cm	Espessura 10 cm	Espessura 15 cm	Espessura 20 cm
CC 60/85	0,22	0,25	0,42	0,73
CD 60/85	0,60	0,68	0,77	0,84

Conforme resultados apresentados na Tabela 32, a incorporação de cal não trouxe benefícios para a Vida de Fadiga das misturas elaboradas com ligante modificado, sendo que inclusive, para as espessuras de 5 e 10 cm de revestimento asfáltico, a redução foi de mais de 70% quando incorporada cal calcítica e mais de 30% quando adicionada cal dolomítica.

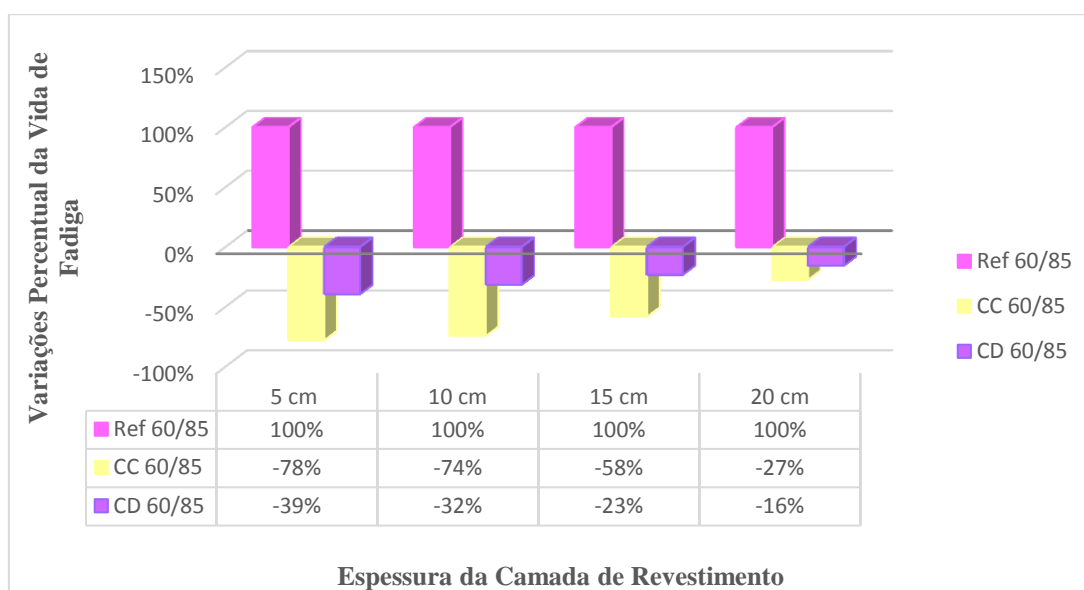


Figura 58: Variações das Vidas de Fadiga em percentual das misturas com ligante modificado com a Vida de Fadiga da mistura referência com ligante convencional (Ref 50/70)



## 6 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Neste capítulo serão apresentadas as principais conclusões da pesquisa no que se refere as propriedades mecânicas dos concretos asfálticos elaborados com ligantes asfálticos convencional e modificado, incorporação de cal (calcítica e dolomítica) e agregado pétreo do tipo granito.

### 6.1 CONCLUSÕES

A pesquisa relatada nesta dissertação foi desenvolvida com o objetivo de se avaliarem os efeitos da adição de cales (calcítica e dolomítica) na vida de fadiga e na resistência ao dano por umidade induzida de concretos asfálticos elaborados com agregados de granito e ligantes asfálticos convencional (CAP 50/70) e polimerizado (AMP CAP 60/85). Para tal, os materiais foram caracterizados e as misturas asfálticas dosadas de acordo com o método Marshall, complementado com medidas de resistência à tração na compressão e módulo de resiliência, ambos na compressão diametral.

Os teores de ligante asfáltico foram definidos de forma a ter-se em todas as misturas um volume de vazios de 4%. Nos concretos asfálticos com ligante convencional foram definidos os seguintes teores de ligante: 4,3% para a mistura de referência (sem cal), 4,5% para a mistura com cal calcítica e 3,7% para a mistura com cal dolomítica. Nos concretos asfálticos com ligante polimerizado os teores foram: 4,5% para a mistura de referência (sem cal), 4,6% para a mistura com cal calcítica e 4,4% para a mistura com cal dolomítica. De forma geral, os teores de ligante das misturas foram muito semelhantes, excetuando-se o concreto asfáltico com ligante convencional e cal dolomítica, com teor significativamente menor.

Com base nos resultados dos ensaios e suas análises, destacados nos Capítulos 4 e 5, são apresentadas as seguintes conclusões, enfatizando-se que as mesmas são válidas para misturas semelhantes às estudadas, e não devem ser estendidas para misturas constituídas por agregados de outra mineralogia.

- A adição de cales aumentou de forma significativa a vida de fadiga de concretos asfálticos elaborados com ligante convencional (CAP 50/70) e agregados de granito. A cal calcítica aumentou em aproximadamente 330% a vida de fadiga de pavimentos

com espessuras de camadas asfálticas entre 5 e 20 cm. De forma semelhante, a adição de cal dolomítica resultou em aumento da vida de fadiga de até 348% para revestimentos com espessuras de 5 a 15 cm, embora para a espessura de camada de 20 cm, a adição desse tipo de cal tenha reduzido em cerca de 20% a vida de fadiga.

- De forma diferente, a adição de cales aos concretos asfálticos elaborados com ligante polimerizado AMP CAP 60/85 e agregados de granito não promoveu aumento, e sim redução, da vida de fadiga.
- Ao analisarem-se os efeitos da adição de cales na resistência ao dano por umidade induzida, constata-se que ao adicionar-se cal calcítica, a resistência retida à tração (RRT) do concreto asfáltico com ligante convencional aumentou de 68 para 76%. Contudo, melhoria semelhante não foi obtida quando se adicionou cal dolomítica, pois a RRT da mistura caiu de 68 para 57%, ficando muito abaixo do valor adotado para aceitação (70%). É possível que o mau comportamento dessa mistura esteja associado ao baixo teor de ligante da mesma (3,7%). Os concretos asfálticos elaborados com ligante polimerizado apresentaram elevados valores (90% ou mais) de RRT, mesmo sem adoção de cal e a adição de cal não aumentou a resistência ao dano por umidade induzida.

Além dessas conclusões principais, também pode-se inferir as que seguem.

- Embora a cal seja considerada um eficiente melhorador de adesividade, isso não foi comprovado nesta pesquisa. Nenhuma combinação de agregados de granito, ligantes e cales resultou em efeito satisfatório no ensaio de adesividade DNER-ME 078-94. Mesmo com diferentes formas de incorporação e diferentes teores e tipos de cales, só foi possível a obtenção de adesividade satisfatória entre os agregados graníticos e os ligantes asfálticos utilizados quando foi incorporado 0,3% de DOPE (aditivo melhorador de adesividade).
- A adição de cales aumentou significativamente (de 35 a 40%) o Módulo de Resiliência dos concretos asfálticos com ligante convencional CAP 50/70, o que pode ser entendido como um enrijecimento dos mesmos e já fora observado em pesquisas anteriormente realizadas no LAPAV e nos Estados Unidos. A mistura de referência teve módulo igual a 6415 MPa, enquanto aquelas com cales calcítica e dolomítica

alcançaram módulos de 8643 MPa e 8986 MPa, respectivamente. Já as misturas com ligante polimerizado não apresentaram uma tendência uniforme; a mistura sem cal teve módulo igual a 5360 MPa, sendo os módulos das misturas com cal calcítica e dolomítica respectivamente iguais a 3600 MPa (redução de 33%) e 6236 MPa (aumento de 16%).

- A Resistência à Tração na Compressão Diametral das misturas com CAP 50/70 aumentou ligeiramente de 1,15 MPa (referência) para 1,21 MPa e 1,30 MPa, ao adicionarem-se cales calcítica e dolomítica. Nas misturas com ligante modificado, os resultados seguiram tendência semelhante ao observado no Módulo de Resiliência; a resistência da mistura de referência igual a 1,48 MPa diminuiu para 1,26 MPa (redução de 15%) ao adicionar-se cal calcítica e aumentou para 1,73 MPa (acrescimento de 17%) quando se acrescentou cal dolomítica.

No geral, pode-se afirmar que nesta pesquisa, quando foi utilizado ligante convencional, a adição de 1% de cal hidratada promoveu melhorias significativas nas propriedades mecânicas dos concretos asfálticos, com aumento do Módulo de Resiliência, da Resistência à Tração e da vida de fadiga. Para as misturas com ligante modificado, não foi observado o mesmo comportamento, sendo a adição de cal calcítica causou redução nos valores de RT, MR e vida de Fadiga, quando comparados à mistura de referência.

O desempenho das misturas elaboradas com ligante modificado pode ter sido afetado por reações químicas entre os componentes do modificador, a cal e o agregado de granito, o que merece uma investigação mais aprofundada.

Finalizando, se observa que, na atualidade, no sul do Brasil, a tendência é de se construírem pavimentos com revestimentos asfálticos espessos ( $\geq 15$  cm), mas, por razões econômicas, apenas a camada superficial é produzida com ligante polimerizado. Nessa conjuntura, os resultados aqui analisados apontam para a conveniência de se adicionar cal calcítica aos concretos asfálticos empregados na camada inferior do revestimento (a que está em contato com a base de brita graduada e sujeita a esforços de tração, sendo crítica em termos de fadiga), quando os mesmos forem constituídos por CAP 50/70 e agregados de granito. Como já mencionado, nesses concretos a adição de cal calcítica, além de aumentar a vida de fadiga,

aumenta a resistência ao dano por umidade induzida; ou seja, têm efeitos sinérgicos que a tornam um fíler ativo.

## 6.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Objetivando aprofundar o conhecimento do comportamento de misturas asfálticas elaboradas com agregados graníticos e com incorporação de cal hidratada, sugere-se:

- Realizar a Dosagem Superpave das misturas para verificar a influência da cal hidratada frente distintas metodologias de dosagem e compactação;
- Verificar a influência da cal no comportamento mecânico de misturas preparadas com ligantes modificados por distintos tipos de polímeros;
- Avaliar a resistência à deformação permanente das misturas estudadas nesta pesquisa e a influência da cal hidratada e do tipo de agregado neste parâmetro;
- Avaliar a influência do envelhecimento do ligante no comportamento mecânico das misturas asfálticas com ligante convencional e modificado;
- Avaliar quimicamente a interação entre a cal e o ligante modificado por polímero;
- Avaliar a influência dos ligantes asfálticos quando utilizado o ensaio de fadiga por flexão alternada em vigotas para a determinação da Vida de fadiga;
- Projetar e avaliar o comportamento de misturas elaboradas utilizando valores de módulo de resiliência e resistência à tração como critérios de dosagem;
- Executar trechos experimentais em rodovias, objetivando avaliar o desempenho dos concretos asfálticos com incorporação de cal.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15235: **Materiais asfálticos: determinação do efeito do calor e do ar em uma película delgada rotacional**. Rio de Janeiro, 2005.

ABPC – Associação Brasileira dos Produtores de Cal. São Paulo, 2008. Disponível em: <<http://www.abpc.org.br/>>

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. **Cimentos asfálticos de petróleo**. Resolução nº19 de 11 de julho de 2005 – Regulamento Técnico ANP nº 03/2005.

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. **Cimentos asfálticos de petróleo modificados por polímero elastomérico**. Resolução nº32 de 21 de setembro de 2010 da ANP – Regulamento Técnico ANP nº 04/2010.

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. Resistance of Compacted Bituminous Mixture Induced Damage. AASHTO T283-89. In: American Association of State Highway Transportation Officials, 1989.

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.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Standard Test Method for Effect of Heat and Air on a Moving Film of Asphalt (Rolling Thin-Film Oven Test)**. ASTM D2872 – 04. In: ASTM...Annual Book of ASTM Standards, Philadelphia, 2004.

ASPHALT INSTITUTE. **Mix Design Methods for Asphalt Concrete and Other Hot-mix Types**. Lexington, Manual Series No2 (MS-2), 6 ed. 1995, 141p.

BARRA, B.S. **Avaliação da Ação da Água no Módulo Complexo e na Fadiga de Misturas Asfálticas Densas**. Tese de Doutorado em Engenharia Civil. Florianópolis, 2009.

BERNUCCI, L. B.; LEITE, L. M.; MOURA, E. **Propriedades mecânicas em laboratório de misturas asfálticas convencionais e modificadas por polímeros**. Anais do 16º Encontro do Asfalto. Rio de Janeiro: Horta Barbosa, 2002. p. 1-9.

BERNUCCI, L. B.; MOTTA, L. M. G.; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B. **Pavimentação Asfáltica: Formação Básica para Engenheiros**. Rio de Janeiro, PETROBRAS, ABEDA, 2008, 501p.

BIRMAN, S. **Concreto asfáltico**. 2.ed. reimp. Rio de Janeiro: Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (DNER), 1982, 32 p.

BOCK, A. L.; HARTMANN, D.; BUDNY, J.; SPECHT, L. P.; CERATTI, J. A. P. **Avaliação de diferentes métodos de adição de cal em misturas de concreto asfáltico**. In: IV SINAPRE - Simpósio Internacional de avaliação de pavimentos e projeto de reforço. Fortaleza – CE. UFC, 2009. v.1. p.1 – 14.

BRASIL. Ministério das Minas e Energia. Secretaria de Geologia, Mineração e Transformação Mineral - SGM. **Desenvolvimento de estudos para elaboração do plano duodecenal (2010-2030) de geologia, mineração e transformação mineral**. PERFIL DA CAL. Brasília, 2009.

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

BUDNY, Jaelson. **Avaliação do Comportamento Mecânico Misturas Asfálticas Mornas**. Rio de Janeiro, 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia). UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Civil, 2012.

CHACHAS, C. V.; LIDDLE, W. J.; PETERSON, D. E. e WILEY M. L. **Use of hydrated lime in bituminous mixtures to decrease hardening of the asphalt cement. Report PB 213**. Salt Lake City (Utah, USA): Utah State Highway Department, 1971.

CNT – **Confederação Nacional dos Transportes. Pesquisa Rodoviária 2010**. Disponível em <http://www.sistamacnt.org.br/pesquisarodoviaria/2010> (acessado em 20/10/2010).

COLPO, G. B. – **Análise de Fadiga de Misturas Asfálticas Através do Ensaio de Flexão em Viga Quatro Pontos**. Porto Alegre, 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola de Engenharia. Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

CURTIS, C. W.; ENSLEY, K.; EPPS J. **Fundamental Properties of Asphalt-Aggregate Interactions including Adhesion and Absorption. SHRP Report A-341**. Washington (District of Columbia, USA): National Research Council, 1993.

DE CEZARO JUNIOR, TADEU. **Estudo das propriedades mecânicas de misturas convencionais e modificadas**. Porto Alegre, 2008. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 130p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **Misturas Betuminosas – Determinação da Resistência a Tração por Compressão Diametral. DNER – ME 138/94.** Rio de Janeiro, 1994, 4p.

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

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGEM. **Misturas Betuminosas – Determinação do Módulo de Resiliência. DNER – ME 133/94.** Rio de Janeiro, 1994, 5p.

EULA - European Lime Association. **Hydrated lime: a proven additive for durable asphalt pavements. Critical literature review.** Report to the European Lime Association / Asphalt Task Force. September, 2010.

FARJALLAT, J. E. S. (1972), **Desagregabilidade de Rochas e Problemas Relativos a sua Aplicabilidade**, 4ª Semana Paulista de Geologia Aplicada, Associação Paulista de Geologia Aplicada. p. 19-35, São Paulo.

FERNANDES JUNIOR, J. L. **Investigação dos efeitos das solicitações do tráfego sobre o desempenho de pavimentos.** São Carlos, 1994. Tese (Doutorado em Engenharia dos Transportes) – Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo, 313 p.

FHWA, **Background of Superpave Asphalt Mixture Design and Analysis. Federal Highway Administration**, FHWA-SA-95- 003. Lexington, KY, USA, 1994.

FONTES, L. P. T. L. **Otimização do Desempenho de Misturas Betuminosas com Betume Modificado com Borracha para Reabilitação de Pavimentos.** Tese de Doutorado. Universidade do Minho. Universidade Federal de Santa Catarina. 545 p., 2009.

FURLAN, A. P. **Condições acerca da adesão e da susceptibilidade à umidade de misturas asfálticas densas à luz de algumas propriedades mecânicas.** São Carlos, 2006. (Tese de Doutorado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. 120p.

GRABOWSKI, W.; WILANOWICZ, J; SOBOL, T. **Structural and functional properties of mineral fillers modified with hydrated lime.** Proc. 6th International Conference on Maintenance and Rehabilitation of Pavements and Technological Control (MAIREPAV6), Torino (Italy), paper 78, July 2009.

GUIMARÃES, J. E. P. **A Cal – Fundamentos e Aplicações na Engenharia Civil.** 2ª ed. PINI, São Paulo, 2002.

GUIMARÃES, J. E. P. **A Indústria de Cal no Brasil.** ABPC. São Paulo, 1990.

HERRINGTON, P. e BALL, G. **Temperature dependence of asphalt oxidation mechanism.** Fuel, v. 75, n. 9, 1996.

HICKS, R. G.; SCHOLZ, T. V. **Life Cycle Costs for Lime in Hot Mix Asphalt**. 3 vol., Arlington (Virginia, USA): National Lime Association, 2003.

HICKS, R. P. **Moisture damage in asphalt concrete**. **National Cooperative Highway Research Program**. Synthesis of Highway Practice 175, Transportation Research Board, Washington, 1991, 91p.

HICKS, R.G.; SCHOLZ, T.V. **Life Cycle Cost for Lime in Hot Mix Asphalt**. Report and Software for National Lime Association, 2001. ISHAI, I.; CRAUS, J. **Effect of the filler on aggregate-bitumen adhesion properties in bituminous mixtures**. Proc. Association Asphalt Paving Technologists 43, pp.228–258, 1977.

JOHANSSON, L. **Bitumen ageing and hydrated lime**. Ph. D Thesis, Royal Institute of Technology, Stockholm (Sweden) 1998.

JOHANSSON, L. S. BRANTHAVER, J. F.; ROBERTSON, R. E. **A study of rheological properties of lime treated paving asphalts aged at 60°C in a pressure aging vessel**. Fuel Science Technology Int. 13(10), pp.1317-1343, 1995.

KANDHAL, P. S.; RICKARDS, I. J. **Premature failure of asphalt overlays from stripping: Case histories**. J. Association Asphalt Paving Technologists 70, 2001.

KIM, O. X.; BELL, C.A.; HICKS, R. G. **The Effect of Moisture on the Performance of Asphalt Mixtures**. ASTM STP-899, 1995.

LAMONTAGNE, J.; KISTER, J.; DURRIEU F.; PLANCHE J-P.; MOUILLET V. **New investigations on ageing of polymer modified asphalts by infrared microspectry imaging**. Anais da 52st Pittsburgh Conference, New-Orleans, USA, 2002.

LITTLE, D. N.; PETERSEN, J. C. **Unique effects of hydrated lime filler on the performance-related properties of asphalt cements: Physical and chemical interactions revisited**. J. Materials in Civil Engineering 17(2), p.207-218, 2005.

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. 80p.

LUTIF, J. E. S.; KIM, Y. R.; SOARES J. B. **Influência do método de adição de cal hidratada em misturas asfálticas para reduzir os danos devido à umidade em pavimentos flexíveis**. In: XXI ANPET - XXI Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, Rio de Janeiro, 2007.



MC CANN, M.; SEBAALY, P. E. **Evaluation of Moisture Sensitivity and Performance of Lime in Hot-Mix Asphalt**. In Transportation Research Record, No. 1832, TRB, National Research Council, Washington, D.C., pp. 09-16, 2003.

MEDINA, J. de; MOTTA, L. M. G. **Mecânica dos Pavimentos**. Rio de Janeiro: Editora UFRJ, 574p. 2005.

MORILHA JUNIOR, A. **Estudo sobre a ação de modificadores no envelhecimento dos ligantes asfálticos e nas propriedades mecânicas e de fadiga das misturas asfálticas**. Florianópolis, 2004. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – Universidade Federal de Santa Catarina, 165p.

MOURA, E. **Estudo do efeito de aditivos químicos e da cal como agentes melhoradores de adesividade em misturas asfálticas densas**. São Paulo, 2001. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 122p.

NÚÑEZ, W. P; CERATTI, J. A. P; PERACA, V.; TSUKUDA, R. S. **Produzindo misturas asfálticas de elevado desempenho com emprego de cal hidratada**. ABPv - 38a Reunião Anual de Pavimentação – Manaus, 2007, 15 p.

PÉREZ JIMÉNEZ, F.; R. MIRÓ RECASENS. **Characterization procedure of asphalt binders with the Cántabro Test**. UCL Method. Summaries and Papers, 5th. Eurobitume Congress, Estocolmo, Jun. 16-18, Vol. 1A, 1993, pp. 209-213.

PETERSEN, J. C.; PLANCHER, H. and HARNSBERGER, P. M. **Lime treatment of asphalt to reduce age hardening and improve flow properties**. Proc. Association Asphalt Paving Technologists 56, p.632-653, 1987.

PICKERING, K.; SEBAALY, P. E.; STROUP-GARDINER, M.; EPPS, J. A. **Evaluation of new generation of antistripping additives**. Transportation Research Record 1342, pp.26-34, 1992.

PINTO, SALOMÃO. **Estudo do Comportamento à Fadiga de Misturas Betuminosas e Aplicação na Avaliação Estrutural de Pavimentos**. Rio de Janeiro, 1991. Tese de Doutorado – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – COPPE/UFRJ, 130p.

PLANCHER, H.; GREEN, E. L.;PETERSEN, J. C. **Reduction of oxidative hardening of asphalts by treatment with hydrated lime – a mechanistic study**. Proc. Association Asphalt Paving Technologists 45, pp.1-24, 1976.

PREUSSLER, E.S. **Estudo da deformação Resiliente dos Pavimentos Flexíveis e aplicação ao Projeto de Camadas de Reforço**. Tese DSc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro 1983.

READ, J.; WHITEOAK, D. **The Shell Bitumen Handbook**. Fifth Edition. Chertsey: Shekk Bitumen UK, 2003.

ROBERTS, F.L.; KANDHAL, P.S.; BROWN, E.R.; LEE, D.Y.; KENNEDY, T.W. **Hot mix asphalt materials, mixture design, and construction**. 1.ed. Napa Education Foundation. Lenham, Maryland, 1991.

RUIZ, C. **Sobre las propiedades mecánicas del sistema filler-betún**. Proc. Segunda Reunión Anual del Asfalto, Buenos Aires, Argentina, Nov. 17-22, 1947, pp. 25-52.

SEBAALY, P. E. **Comparison of Lime and Liquid Additives on the Moisture Damage of Hot Mix Asphalt Mixtures**. Virginia, USA. National Lime Association, 2007.

SEBAALY, P. E., LITTLE, D. N. & EPPS, J. A. **The Benefits of Hydrated Lime in Hot Mix Asphalt**. Arlington (Virginia, USA): National Lime Association, 2006.

SILVA, L. S. **Contribuição ao estudo do envelhecimento de ligantes asfálticos. Influência da adição de polímeros e comportamento frente à radiação UV**. Porto Alegre, 2005. (Tese de Doutorado em Engenharia: Ciência dos materiais) – UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 155p.

SOUSA, J. B., CRAUS, J. e MONISMITH, C. L. **Summary Report on Permanent Deformation in Asphalt Concrete**. SHRP Report A/IR 91-104, Washington (District of Columbia, USA): National Research Council, 1991.

SPECHT, L. P. **Avaliação de misturas asfálticas com incorporação de borracha reciclada de pneus**. Porto Alegre, 2004. (Tese de Doutorado em Engenharia Civil) – UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 279p.

SU, K.; SUN, L.; HACHIYA, Y.; MAEKAWA, R. **Analysis of Shear Stress in Asphalt Pavements Under Actual Measured Tire-Pavement Contact Pressure**. In: Proceedings of the 6th ICPT. Japan. p.11-18. 2008.

SVASDISANT, T.; G. BALADI. **Identify Causes for Under Performing Rubblized Concrete Pavement Projects Phase II**. Research Report RC-1416, Michigan Department of Transportation, August 2002.

TERREL, R. L., AL-SWAILMI, S. **Water Sensitivity of Asphalt-Aggregate Mixes: Test Selection. Strategic Highway Research Program, SHRP-A-403**. National Research Council, Washington, D. C. 1994.

TONIAL, I. A. **Influência do envelhecimento do revestimento asfáltico na vida de fadiga de pavimentos**. Rio de Janeiro, 2001. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – COPPE/UFRJ - Universidade Federal do Rio de Janeiro, 244p.

VOSKUILEN, J. L. M.; VERHOEF, P. N. W. **Causes of premature ravelling failure in porous asphalt.** Proc. RILEM symposium on Performance Testing and Evaluation of Bituminous Materials, p.191-197, 2003.

WANG. H; AL-QADI, I.L. **Near-Surface Pavement Failure Under Multiaxial Stress State in Thick Asphalt Pavement.** Transportation Research Record. N° 2514. p.91-99., 2010.