

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

**EFEITOS DA INCORPORAÇÃO DE CAL HIDRATADA EM
CONCRETOS ASFÁLTICOS ELABORADOS COM LIGANTE
CONVENCIONAL E MODIFICADO**

André Luiz Bock

Porto Alegre
2012

ANDRÉ LUIZ BOCK

**EFEITOS DA INCORPORAÇÃO DE CAL HIDRATADA EM
CONCRETOS ASFÁLTICOS ELABORADOS COM LIGANTE
CONVENCIONAL E MODIFICADO**

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. Orientação: Prof. Dr. Washington Peres Núñez

Porto Alegre
2012

BOCK, André Luiz

Efeitos da incorporação de cal hidratada em concretos asfálticos elaborados com ligante convencional e modificado / André Luiz Bock. – Porto Alegre: PPGEC/UFRGS, 2012.

142p.

Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul; Mestre em Engenharia. Orientador: Washington Peres Núñez.

1. Pavimentação. 2. Incorporação de cal hidratada.
3. Benefícios. I. Bock, André Luiz.

CCAA2

ANDRÉ LUIZ BOCK

**EFEITOS DA INCORPORAÇÃO DE CAL HIDRATADA EM
CONCRETOS ASFÁLTICOS ELABORADOS COM LIGANTE
CONVENCIONAL E MODIFICADO**

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

Porto Alegre, 24 de maio de 2012

Prof. Washington Peres Núñez
Dr. em Engenharia Civil pelo PPGEC/UFRGS
Orientador

Prof. Luiz Carlos Pinto da Silva Filho
Coordenador do PPGEC/UFRGS

BANCA EXAMINADORA

Prof. Jorge Augusto Pereira Ceratti (UFRGS)
D.Sc. pela COPPE/UFRJ

Profª Liedi L. B. Bernucci (EPUSP)
Dra. em Engenharia de Transportes pela EPUSP

Prof. Luciano Pivoto Specht (UFMS)
Dr. em Engenharia Civil pelo PPGEC/UFRGS

Profª Luciana Rohde (UNISINOS)
Dra. em Engenharia Civil pelo PPGEC/UFRGS

Dedico este trabalho à minha noiva, Susana,
aos meus pais Anildo e Ireci e ao meu irmão Fábio;
pessoas de extrema importância que fizeram parte desta
caminhada, compartilhando amor, sonhos e
companheirismo.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente gostaria de agradecer a Deus pelo dom da vida, pela proteção e pela oportunidade de realizar este sonho.

Gostaria de expressar aqui os meus agradecimentos a todos que participaram e contribuíram nesta caminhada, seja através de orientação técnica e científica, seja através de apoio, incentivo e confiança depositada.

Agradeço ao Prof. Washington Peres Núñez, orientador deste trabalho pela amizade, confiança e oportunidade, pelo incentivo e principalmente pela qualidade de formação.

Ao CNPq e à CAPES pela bolsa de estudos que possibilitou a minha total dedicação às atividades necessárias para o desenvolvimento desta dissertação.

À minha família, pelo incentivo, compreensão e confiança que sempre disponibilizaram, ajudando-me sempre a superar as dificuldades encontradas.

À minha noiva Susana pela compreensão, paciência e determinação para sempre superar as dificuldades impostas pela distância e pela saudade, e principalmente pelo imenso amor que sempre nos ajudou a suportar a ausência física.

À toda equipe do Laboratório de Pavimentação da UFRGS, principalmente ao professor Jorge Augusto Pereira Ceratti e aos funcionários Vinícius Alves, Daniel Fernandes, Luciana Rohde, Lélío Brito e Ivo Azevedo, aos bolsistas Astrid Dittrich, Bruna Rodrigues, Douglas Mocelin, Lélis Espartel, Lysiane Pacheco, Rebeca Schmitz e Suzana Fraga, pelo apoio, disponibilidade e ajuda na realização dos ensaios e principalmente pela amizade, companheirismo e vivência durante o período de desenvolvimento deste trabalho.

Enfim, agradeço a todos os colegas e professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul pelo convívio ao longo do curso, incentivo e amizade.

"Não podemos resolver os problemas com a mesma linha de pensamento que tínhamos quando os criamos."

Albert Einstein

RESUMO

BOCK, A. L. **Efeitos da incorporação de cal hidratada em concretos asfálticos elaborados com ligante convencional e modificado.** 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

O crescente aumento do volume de tráfego, o excesso de cargas e a carência de manutenção têm contribuído cada vez mais para a degradação prematura dos pavimentos asfálticos. Na procura por materiais de elevado desempenho, uma alternativa que vem ganhando destaque é a incorporação de cal hidratada a concretos asfálticos. Nesta dissertação apresentam-se e analisam-se os resultados de uma investigação sobre a influência de dois tipos de cal (calcítica e dolomítica) em misturas asfálticas formuladas com ligante convencional e polimerizado. Os resultados demonstraram que a melhoria das propriedades de concretos asfálticos depende significativamente da qualidade da cal e do teor utilizado, sendo que não se observaram benefícios adicionais ao aumentar-se o teor de 1% para 2%. A cal calcítica mostrou-se mais eficiente na melhoria das propriedades das misturas asfálticas, proporcionando aumentos significativos de módulo de resiliência e resistência à tração. Além disso, nas misturas com cal ocorreram menores reduções de resistência e de módulo com a elevação da temperatura de ensaio e após processo de condicionamento para simular os efeitos deletérios da água e envelhecimento. De forma geral, a influência da cal foi mais efetiva em misturas com ligante convencional, onde sua incorporação promoveu comportamento semelhante, ou em alguns casos até superior, ao das misturas elaboradas com ligante modificado. Amostras sem cal acumularam deformações permanentes superiores no ensaio de *creep* dinâmico às registradas em amostras com cal hidratada, sem observarem-se comportamentos significativamente diferentes com ligantes convencional ou modificado. Ao analisar-se a influência de cal no envelhecimento de ligantes (RTFOT), observaram-se menores variações de viscosidade (menor enrijecimento) em amostras de ligante convencional com cal calcítica, seguindo tendência constatada em trabalhos internacionais, que relatam redução na taxa de envelhecimento em misturas asfálticas devido à incorporação de cal. A análise global dos resultados de ensaios realizados nesta pesquisa aponta que é possível produzir misturas asfálticas de elevado desempenho e durabilidade através da incorporação de cal hidratada, mas que a magnitude dos benefícios obtidos depende significativamente da qualidade da cal (porcentagem de óxido de cálcio) e do tipo de ligante utilizados em sua formulação.

Palavras-chave: *Concreto asfáltico, incorporação de cal hidratada, benefícios*

ABSTRACT

BOCK, A. L. **Effects of adding hydrated lime to asphalt concretes with conventional and modified binders.** 2012. MSc Dissertation. Department of Civil Engineering. Federal University of Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brazil.

The increasing growth of traffic volume and overloading and the lack of maintenance have growingly contributed for asphalt pavements early distress. In the search for high performance materials, the incorporation of hydrated lime to asphalt concretes has been gaining relevance. In this dissertation the results of a research on the influence of two kinds of lime (calcitic and dolomitic) in asphalt concretes (AC) with conventional and polymer binders are presented and analyzed. Laboratory tests results show that the improvement of AC properties highly depend on lime quality and content, no additional benefits being observed when lime content increases from 1% to 2%. Calcitic lime showed to be more efficient improving AC properties, especially regarding resilient modulus and split tensile strength, which significantly increased. Besides, adding lime made asphalt mixes strength and modulus less sensitive to temperature increase and also to hardening and to water deleterious effects. All in all, lime benefits were stronger when added to AC with conventional binder. In fact, asphalt mixtures with conventional binder and calcitic lime performed even better than mixtures with polymer-modified binder. In dynamic creep tests, specimens of AC without lime accumulated higher permanent deformations than AC specimens with hydrated lime, regardless the type of binder. Regarding the influence of lime in binders aging (RTFOT), viscosity variations of lesser magnitude were observed in samples of conventional binder and calcitic lime, following the pattern described in international works, which report the decrease of aging rate of asphalt mixtures due to lime incorporation. Globally, tests results point out that asphalt mixtures with high modulus and resistance to permanent deformation may be obtained by adding hydrated lime. However, the extent of benefits highly depends on lime quality (calcium oxide content) and type of asphalt binder used.

Key-words: asphalt concrete, hydrated lime adding, benefits

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	17
1.1 OBJETIVOS DA PESQUISA	19
1.2 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	20
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	21
2.1 PAVIMENTOS ASFÁLTICOS	21
2.2 MECANISMOS DE DEGRADAÇÃO DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS	22
2.3 ENVELHECIMENTO DE LIGANTES ASFÁLTICOS	28
2.3.1 ETAPAS DE ENVELHECIMENTO	28
2.3.2 MECANISMOS DE ENVELHECIMENTO	29
2.3.3 PROCEDIMENTOS DE ENSAIOS PARA SIMULAÇÃO DO ENVELHECIMENTO	30
2.4 CAL – ORIGEM, APLICAÇÕES E PERSPECTIVAS	32
2.4.1 ORIGENS	32
2.4.2 CLASSIFICAÇÃO	33
2.4.3 PRODUÇÃO DE CAL NO BRASIL	34
2.4.4 PRINCIPAIS APLICAÇÕES	36
2.4.5 PERSPECTIVAS DE DESENVOLVIMENTO DOS MERCADOS	37
2.5 UTILIZAÇÃO DE CAL HIDRATADA EM MISTURAS ASFÁLTICAS	38
2.5.1 CONTEXTO HISTÓRICO	38
2.5.2 MECANISMOS DE MODIFICAÇÃO	39
2.5.3 INFLUÊNCIA NAS PROPRIEDADES DE CONCRETOS ASFÁLTICOS	41
2.5.3.1 RESISTÊNCIA AO ENVELHECIMENTO QUÍMICO	43
2.5.3.2 DANO POR UMIDADE INDUZIDA	45
2.5.3.3 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO	46
2.5.3.4 MÓDULO DE RESILIÊNCIA	48
2.5.3.5 RESISTÊNCIA À DEFORMAÇÃO PERMANENTE	49
3 MATERIAIS E PROCEDIMENTOS LABORATORIAIS	52
3.1 PROGRAMA EXPERIMENTAL	52
3.2 MATERIAIS UTILIZADOS NA PESQUISA	54
3.2.1 AGREGADOS MINERAIS	54
3.2.2 FÍLER	55
3.2.3 LIGANTES ASFÁLTICOS	56
3.2.4 MISTURAS ASFÁLTICAS	58
3.3 PROCEDIMENTOS LABORATORIAIS	58
3.3.1 DOSAGEM MARSHALL	59
3.3.2 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL (RT)	60
3.3.3 MÓDULO DE RESILIÊNCIA (MR)	62

3.3.4 DEFORMAÇÃO PERMANENTE (CREEP DINÂMICO).....	63
3.3.5 EFEITO DELETÉRIO DA ÁGUA (LOTTMAN MODIFICADO)	66
3.3.6 METODOLOGIA UCL® (UNIVERSAL DE CARACTERIZACIÓN DE LIGANTES)	66
3.3.7 EFEITO DO CALOR E DO AR (RTFOT).....	70
4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	72
4.1 ESTUDO DE DOSAGEM E DEFINIÇÃO DE ABORDAGEM.....	72
4.1.1 PARÂMETROS DE DOSAGEM MARSHALL	72
4.1.2 RESISTÊNCIA E MÓDULO DE RESILIÊNCIA	78
4.1.3 ADESIVIDADE	80
4.1.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS SOBRE A ABORDAGEM ADOTADA.....	81
4.2 CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DAS MISTURAS.....	87
4.2.1 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO (RT).....	87
4.2.2 MÓDULO DE RESILIÊNCIA (MR).....	93
4.2.3 ANÁLISE COMPARATIVA: LIGANTE CONVENCIONAL+CAL X LIGANTE MODIFICADO	99
4.2.4 AVALIAÇÃO DAS DEFORMAÇÕES PERMANENTES ATRAVÉS DE CREEP DINÂMICO.....	102
4.2.4.1 DETERMINAÇÃO DOS DESLOCAMENTOS E DEFORMAÇÕES	104
4.2.4.2 DEFORMAÇÕES TOTAIS	106
4.2.4.3 DEFORMAÇÕES PERMANENTES	107
4.2.4.4 DEFORMAÇÕES RECUPERÁVEIS.....	108
4.3 APLICAÇÃO DA METODOLOGIA UCL®.....	110
4.3.1 CURVAS DE ESTADO – VERIFICAÇÃO DE COESÃO E SUSCETIBILIDADE TÉRMICA	112
4.3.2 ADESIVIDADE LIGANTE AGREGADO	119
4.4 AVALIAÇÃO DO ENVELHECIMENTO ATRAVÉS DE ENSAIO RTFOT	122
4.4.1 PROCESSO DE INCORPORAÇÃO DA CAL NO LIGANTE ASFÁLTICO	123
4.4.2 PONTO DE AMOLECIMENTO (PA).....	123
4.4.3 PENETRAÇÃO (PN)	125
4.4.4 VARIAÇÃO DE MASSA.....	126
4.4.5 VARIAÇÃO DE VISCOSIDADE EM FUNÇÃO DO PROCESSO DE ENVELHECIMENTO.....	127
4.4.5.1 LIGANTE CONVENCIONAL CAP 50/70.....	127
4.4.5.2 LIGANTE MODIFICADO CAP 60/85-E	130
5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES	134
5.1 CONCLUSÕES.....	134
5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	136
REFERÊNCIAS.....	137

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Comportamento das misturas asfálticas (Adaptado de FERNANDES JR., 1994)...	23
Figura 2: Reservas de Calcários/Dolomitos no Brasil -1990 em milhões de toneladas.....	35
Figura 3: Principais áreas de consumo de cal no Brasil em 2008 segundo ABPC.....	36
Figura 4: Efeito da cal na superfície do agregado (adaptado de ISHAI e CRAUS, 1977).....	40
Figura 5: Vazios de Rigden para diversos tipos de fileres (GRABOWSKI <i>et al.</i> , 2009).....	40
Figura 6: Índice de envelhecimento (PETERSEN <i>et al.</i> , 1987).....	44
Figura 7: Razão de resistência à tração (RRT) das misturas (LUTIF <i>et al.</i> , 2007).....	46
Figura 8: RT antes e após condicionamento das amostras (PICKERING <i>et al.</i> , 1992).....	47
Figura 9: MR antes e após condicionamento das misturas (PICKERING <i>et al.</i> , 1992).....	48
Figura 10: MR em função do tipo e teor de cal (NÚÑEZ <i>et al.</i> , 2007).....	49
Figura 11: Deformação permanente em revestimento asfáltico (BERNUCCI <i>et al.</i> , 2006)	50
Figura 12: Efeito de aditivos na deformação permanente (Adaptado de KIM <i>et al.</i> , 1995)	50
Figura 13: Distribuição granulométrica das cales e agregados utilizados no estudo	55
Figura 14: Composição granulométrica adotada no estudo - Faixa C DNIT	58
Figura 15: Preparação dos agregados e moldagem das amostras.....	60
Figura 16: a) Equipamento utilizado no ensaio de resistência à tração; b) estado de tensões gerado durante o ensaio (Fonte: Specht: 2004)	61
Figura 17: a) Corte esquemático e; b) equipamento para de ensaio de módulo de resiliência; c) Registro gráfico típico do ensaio de módulo de resiliência (Fonte: Specht: 2004).....	63
Figura 18: Esquema de ensaio Creep Dinâmico.....	65
Figura 19: Representação gráfica dos deslocamentos durante o ensaio de <i>Creep Dinâmico</i> ...	65
Figura 20: Máquina de abrasão Los Angeles e amostras após ensaio.....	68
Figura 21: Estufa RTFOT para realização do ensaio de envelhecimento acelerado	70
Figura 22: Variação do volume de vazios (Vv) das misturas com incorporação de cal calcítica (CC) e cal dolomítica (CD) em relação à mistura de Referência	73
Figura 23: Etapas seguidas para análise da influência de adição de cal hidratada.....	74
Figura 24: 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	76
Figura 25: Parâmetros de Dosagem Marshall (CAP 60/85-E) das misturas com incorporação de Cal calcítica (CC) e cal dolomítica (CD) em relação à mistura de Referência	77
Figura 26: Efeitos da incorporação de cales na resistência à tração e no módulo de resiliência a 25°C em misturas com CAP 50/70 (RT e MR em MPa).....	78

Figura 27: Efeitos da incorporação de cales na resistência à tração e no módulo de resiliência a 25°C em misturas com CAP 60/85-E (RT e MR em MPa).....	79
Figura 28: Efeitos da incorporação de cales na resistência retida à tração a 25°C em misturas com CAP 50/70 e CAP 60/85-E (%).....	80
Figura 29: Resultados comparativos de módulo de resiliência e resistência à tração (em MPa) para misturas com ligante convencional e modificado e incorporação de cal.....	82
Figura 30: Variações percentuais de módulo de resiliência e resistência à tração de misturas com ligante convencional e modificado e incorporação de 1% e 2% de cal.....	82
Figura 31: Comparativo de RRT para misturas com 1% e 2% de cal (%).....	84
Figura 32: Variação RRT de misturas com ligante convencional e modificado com 1% e 2% de cal hidratada (MPa).....	85
Figura 33: Resistência à tração de misturas com CAP 50/70; a) para temperaturas distintas com e sem condicionamento das amostras; b) Variação da RT com o condicionamento; c) RT retido em função da temperatura.....	88
Figura 34: Resistência à tração de misturas com CAP 60/85-E; a) para temperaturas distintas com e sem condicionamento das amostras; b) Variação da RT com o condicionamento; c) RT retido em função da temperatura.....	91
Figura 35: Módulo de resiliência de misturas com CAP 50/70; a) para temperaturas distintas com e sem condicionamento das amostras; b) Variação da RT com o condicionamento; c) RT retido em função da temperatura.....	94
Figura 36: Módulo de resiliência de misturas com CAP 60/85-E; a) para temperaturas distintas com e sem condicionamento das amostras; b) Variação da RT com o condicionamento; c) RT retido em função da temperatura.....	97
Figura 37: Resistência à tração e Módulo de resiliência para temperaturas distintas com e sem condicionamento das amostras (MPa).....	100
Figura 38: Variação de resistência à tração e módulo de resiliência em função do condicionamento para temperaturas distintas (%).....	100
Figura 39: Resistência à tração e módulo de resiliência retido em função da temperatura de ensaio com e sem condicionamento das amostras (%).....	101
Figura 40: Esquema padrão de deslocamentos obtidos durante ensaios de Creep Dinâmico (período de condicionamento: 200 ciclos de carregamento + 400 segundos de recuperação e período de ensaio: 3600 ciclos de carregamento + 900 segundos de recuperação) (cm).....	103

Figura 41: Esquema padrão de deslocamentos obtidos durante ensaios de Creep Dinâmico (período de ensaio: 3600 ciclos carregamento + 900 segundos recuperação) (cm).....	103
Figura 42: Deslocamentos obtidos para as misturas ensaiadas	104
Figura 43: Deslocamentos obtidos para as misturas ensaiadas separadas em etapas importantes a) período total de ensaio; b) período inicial de condicionamento (200 ciclos de carga); c) período de condicionamento (200 ciclos de carga + 400 segundos de recuperação); d) recuperação inicial (400 segundos); e) período de ensaio (3600 ciclos de carga); f) período final de recuperação (900 segundos)	105
Figura 44: Deformações totais para misturas com ligante convencional (CAP 50/70) e misturas com ligante modificado (CAP 60/85-E) sem incorporação de cal (REF) e com incorporação de cal calcítica (CC) e cal dolomítica (CD) (%).....	106
Figura 45: Deformações permanentes para misturas com ligante convencional (CAP 50/70) e misturas com ligante modificado (CAP 60/85-E) sem incorporação de cal (REF) e com incorporação de cal calcítica (CC) e cal dolomítica (CD) (%).....	107
Figura 46: Deformações recuperáveis e percentual de recuperação para misturas com ligante convencional (CAP 50/70) e misturas com ligante modificado (CAP 60/85-E) sem incorporação de cal (REF) e com incorporação de cal calcítica (CC) e cal dolomítica (CD).....	109
Figura 47: Percentual de recuperação para misturas com ligante convencional (CAP 50/70) e misturas com ligante modificado (CAP 60/85-E) sem incorporação de cal (REF) e com incorporação de cal calcítica (CC) e cal dolomítica (CD) (%).....	110
Figura 48: Comportamento do ligante asfáltico em função da temperatura a) frágil; b) elastoplástico; c) inconsistente.	112
Figura 49: Curvas de estado das misturas com CAP 50/70 e CAP 60/85-E (%)	113
Figura 50: Detalhe das curvas de estado, perda de massa em função da temperatura de condicionamento das amostras (maior → menor perda de massa) (%)	114
Figura 51: Diferença da perda de massa em função do tipo de ligante asfáltico utilizado (diferença percentual na qual as misturas com ligante modificado se sobressaem sobre as misturas com ligante convencional em termos de resistência ao desgaste) (%)	115
Figura 52: Melhoria de coesão das misturas representada pelo percentual de diminuição da perda de massa em relação à mistura sem fíler; a) misturas com ligante convencional; b) misturas com ligante modificado CAP 60/85-E (%).....	116
Figura 53: Diferença do percentual de melhoria da coesão das misturas a) entre os tipos de ligante; b) entre os tipos de cal	117

Figura 54: Comparativo entre curvas de estado de amostras preparadas com ligante modificado com polímeros (60/85 REF) e misturas com ligante convencional com incorporação de cal (50/70 + CC e 50/70 + CD).....	119
Figura 55: Perda de massa com condicionamento e sem condicionamento das amostras de misturas com CAP 50/70 e incorporação de cal (%).....	120
Figura 56: Perda de massa com condicionamento e sem condicionamento das amostras de misturas com CAP 60/85-E e incorporação de cal (%).....	121
Figura 57: Densidade antes e após incorporação de cal (g/cm ³); a) ligante convencional; b) ligante modificado	123
Figura 58: a) PA antes e após RTFOT ligante convencional (°C); b) Aumento PA (°C); c) PA antes e após RTFOT ligante modificado (°C); d) Aumento PA (°C).....	124
Figura 59: a) PN antes e após RTFOT ligante convencional (dmm); b) Penetração retida (%); c) PN antes e após RTFOT ligante modificado (dmm); d) Penetração retida (%).....	125
Figura 60: Variação de massa após envelhecimento RTFOT; a) ligante convencional; b) ligante modificado (%)	126
Figura 61: Índice de envelhecimento de amostras de Referência (ligante puro) e amostras com incorporação de cal calcítica (CC) e dolomítica (CD) após 85 minutos em estufa RTFOT (razão entre viscosidade após envelhecimento e viscosidade inicial) CAP 50/70	128
Figura 62: Índice de envelhecimento de amostras de Referência (ligante puro) e amostras com incorporação de cal calcítica (CC) e dolomítica (CD) após 120 minutos em estufa RTFOT CAP 50/70.....	129
Figura 63: Variação percentual do índice de envelhecimento das amostras de Referência (ligante puro CAP 50/70) e com incorporação de cal (120minutos - 85 minutos).....	130
Figura 64: Índice de envelhecimento de amostras de Referência (ligante puro) e amostras com incorporação de cal calcítica (CC) e dolomítica (CD) após 85 minutos em estufa RTFOT CAP 60/85-E	131
Figura 65: Índice de envelhecimento de amostras de Referência (ligante puro) e amostras com incorporação de cal calcítica (CC) e dolomítica (CD) após 120 minutos em estufa RTFOT CAP 60/85-E.....	132
Figura 66: Variação percentual do índice de envelhecimento das amostras de Referência (ligante puro CAP 60/85-E) e com incorporação de cal (120minutos - 85 minutos).....	132

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Principais defeitos em revestimentos asfálticos	25
Tabela 2: Influência da incorporação de cal hidratada em misturas de concreto asfáltico	51
Tabela 3: Ensaio realizados em misturas asfálticas	53
Tabela 4: Ensaio realizados em ligantes asfálticos	53
Tabela 5: Características dos agregados utilizados no estudo	54
Tabela 6: Distribuição granulométrica dos agregados e das cales	54
Tabela 7: Características físicas das cales utilizadas na pesquisa	56
Tabela 8: Características químicas das cales utilizadas na pesquisa	56
Tabela 9: Especificação para cimentos asfálticos de petróleo modificados por polímero elastomérico ANP nº 04/2010.	57
Tabela 10: Propriedades do ligante convencional - CAP 50/70(ANP, 2005)	57
Tabela 11: Propriedades do ligante modificado por polímero - CAP 60/85-E (ANP, 2010)...	57
Tabela 12: Resultados para misturas com ligante convencional CAP 50/70 nos teores de projeto (Referência, Cal Calcítica e Cal Dolomítica).....	75
Tabela 13: Resultados para misturas com ligante modificado CAP 60/85-E nos teores de projeto (Referência, Cal Calcítica e Cal Dolomítica).....	75
Tabela 14: Resultados de RRT para misturas com incorporação de 1% e 2% de cal	84
Tabela 15: Variação dos resultados de RTT, RT e MR com incorporação de 1% e 2% de cal	86
Tabela 16: Variação percentual das propriedades das misturas asfálticas em função da incorporação de cal e condicionamento das amostras (25°C).....	99
Tabela 17: Variação percentual das propriedades das misturas asfálticas em função da incorporação de cal e condicionamento das amostras (35°C).....	99
Tabela 18: Principais características das misturas Metodologia UCL	111

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

AASHTO: *American Association of Highway and Transportation Officials*

ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas

ABPC: Associação Brasileira de Produtores de Cal

ANP: Agência Nacional do Petróleo

ASTM: *American Society of Testing and Materials*

ATR: Afundamento de Trilha de Roda

CA: concreto asfáltico

CAP: Cimento Asfáltico de Petróleo

CNT: Confederação Nacional de Transportes

DAER: Departamento Autônomo de Estradas de Rodagem

DNER: Departamento Nacional de Estradas de Rodagem

DNIT: Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes

DSR: *Dynamic Shear Rheometer*

FTIR: *Fourier Transform Infrared*

GPC: *Gel Permeation Chromatography*

LAPAV: Laboratório de Pavimentação

MISTURA CC: Mistura de concreto asfáltico com incorporação de cal calcítica

MISTURA CD: Mistura de concreto asfáltico com incorporação de cal dolomítica

MISTURA REFERÊNCIA: Mistura de concreto asfáltico sem incorporação de cal

MR: Módulo de Resiliência

PAV: *Pressure Aging Vessel*

RBV: Relação Betume Vazios

RRT: Resistência Retida à Tração

RT: Resistência à Tração

RTFOT: *Rolling Thin Film Oven Test*

SHRP: *Strategic Highway Research Program*

TDC: *Top Down Cracking*

UCL®: *Universal de Caracterización de Ligantes*

UFRGS: Universidade Federal do Rio Grande do Sul

VAM: Vazios do Agregado Mineral

VV: Volume de Vazios

1 INTRODUÇÃO

A importância da existência de rodovias em boas condições de trafegabilidade e segurança é indiscutível. Uma adequada infraestrutura viária com revestimento asfáltico em bom estado de conservação, além de proporcionar benefícios diretos aos usuários como a melhoria dos níveis de conforto e segurança, ainda possibilita a redução dos custos operacionais dos veículos, acelera o progresso socioeconômico do país, repercutindo positivamente na qualidade de vida, estruturação espacial das comunidades, além de promover o escoamento da produção agrícola e industrial, incrementando assim as riquezas nacionais.

Ao analisar-se o sistema viário brasileiro, observa-se que sua matriz de transporte é predominantemente rodoviária. Esta característica faz com que a infraestrutura viária assuma um papel fundamental na mobilidade em nosso país, visto que essa modalidade corresponde a mais de 90% da matriz de transporte de passageiros e a cerca de 60% da matriz de transporte de cargas. Assim, rodovias em boas condições se traduzem em melhores condições operacionais e vantagens em termos de desempenho e de custo (CNT, 2010).

A política brasileira de desenvolvimento rodoviário tem historicamente privilegiado o pavimento asfáltico, principalmente em virtude de seu custo inicial ser em geral inferior ao de concreto de cimento Portland e da facilidade construtiva. Tem-se assim uma predominância de pavimentos asfálticos em nossa malha rodoviária.

Os concretos asfálticos (CA) constituem o material de uso mais difundido no Brasil, responsáveis por cerca de 98% dos nossos revestimentos de pavimentos. Os revestimentos asfálticos têm sido empregados em diferentes tipos de pavimentos, sob diferentes solicitações: desde em vias com baixo volume de tráfego até naquelas de tráfego intenso e pesado, como nas autoestradas, corredores de ônibus, entre outros (BERNUCCI *et al.*, 2002).

Nas últimas décadas, os pavimentos asfálticos brasileiros têm tido seu desempenho comprometido devido ao crescente aumento do volume de tráfego e do excesso de cargas, que causam degradação prematura. O aumento do número de veículos pesados e a circulação com excesso de carga, devido à baixa densidade de balanças para fiscalização, fazem com que os pavimentos tenham suas vidas úteis expressivamente reduzidas.

A degradação dos pavimentos, somada à carência de manutenção e ao crescimento do tráfego comercial rodoviário impõe sempre mais o desafio de aumentar a vida útil dos pavimentos. Novos materiais e novas técnicas têm sido estudados nos principais centros de pesquisa do mundo, buscando melhorar a qualidade das misturas e atenuar o problema de degradação prematura dos revestimentos.

Uma das alternativas bastante pesquisada ultimamente é a incorporação de cal hidratada como agente melhorador de desempenho dos concretos asfálticos. Investigações laboratoriais e investigações de campo têm mostrado que a cal melhora o desempenho das misturas asfálticas de várias maneiras.

Estudos publicados na década passada nos Estados Unidos demonstraram que a incorporação de cal hidratada em concretos asfálticos, além de melhorar a adesividade agregado-ligante, aumenta a rigidez da mistura, sem prejuízo da vida de fadiga. Além disso, segundo Little *et al.* (2006), a cal interage com produtos de oxidação, reduzindo seus efeitos deletérios. Hicks e Scholz (2001) afirmam que as modificações produzidas pela sua incorporação podem acrescentar anos à vida das misturas asfálticas, contribuindo para a formação de pavimentos que apresentarão elevado desempenho por muitos anos.

Portanto, à luz da bibliografia internacional, o conjunto de benefícios resultantes da incorporação de cal hidratada em misturas de CA tem como resultado a geração de um produto superior e de elevado desempenho.

No Brasil a cal hidratada já é usada há algum tempo em concretos asfálticos como material de enchimento (fíler) e/ou melhorador de desempenho, porém, são poucos os estudos que quantificaram os benefícios de sua incorporação no desempenho de misturas asfálticas.

Em 2007 Núñez *et al.* verificaram que 1% de incorporação de cal com elevados teores de Ca(OH)_2 era suficiente para promover aumentos significativos no módulo de resiliência e na resistência à tração. Aumentos no teor de cal não proporcionaram melhorias adicionais.

Lutif *et al.* (2007) testaram diversas formas de incorporação de cal em concretos asfálticos, misturas tratadas com cal seca foram mais resistentes ao dano devido à umidade, resultados semelhantes, quanto a forma de incorporação, foram obtidos por Bock *et al.* (2009) ao incorporar cal seca ao agregado graúdo. De forma geral, reduções importantes na perda de adesão são observadas com a incorporação de cal hidratada em concretos asfálticos.

1.1 OBJETIVOS DA PESQUISA

Diante do contexto apresentado, a pesquisa relatada nesta Dissertação foi desenvolvida com o objetivo principal de investigar a possibilidade de se produzir concretos asfálticos de elevado desempenho e durabilidade, por meio da incorporação de cal hidratada.

Ainda, ao planejar-se esta pesquisa, considerou-se necessário confirmar, através de um estudo mais abrangente, a validade de resultados de estudos preliminares realizados no Laboratório de Pavimentação (LAPAV) da UFRGS (NÚÑEZ *et al.*, 2007), nos quais concluiu-se que as melhorias nas propriedades mecânicas e de adesividade dependem significativamente do tipo e da qualidade da cal utilizada.

Assim, foram projetadas e ensaiadas misturas com incorporação de dois tipos de cal hidratada (calcítica e dolomítica) e de ligantes asfálticos (convencional e modificado por polímero). Além dessas quatro combinações de cales e ligantes, estudaram-se outras duas misturas de referência, também com ligante convencional e modificado, mas sem incorporação de cal.

Para alcançar-se o objetivo geral, os seguintes objetivos específicos foram propostos:

- a) Determinar os parâmetros de dosagem Marshall (VV, VAM, RBV, Estabilidade e Fluência) e analisar a influência da incorporação de cal nos mesmos.
- b) Esclarecer, através da análise de desempenho de misturas estudadas, quais os fatores que influenciam, de forma predominante, na melhoria das propriedades mecânicas, no desempenho das misturas, em termos de rigidez e resistência à deformações permanentes, e na coesão e suscetibilidade térmica, através da metodologia Universal de Caracterización de Ligantes (UCL®).
- c) Adicionalmente, analisaram-se os efeitos da incorporação de diferentes tipos de cales no envelhecimento por oxidação das misturas asfálticas (através de processos de condicionamento de amostras) e de ligantes asfálticos (por meio de envelhecimento em estufa RTFOT).

1.2 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Esta Dissertação está estruturada em cinco capítulos. Neste primeiro foi apresentado o tema de pesquisa, destacando sua relevância para os meios rodoviário e científico, identificando os objetivos que se propôs alcançar.

No segundo capítulo, intitulado REVISÃO BIBLIOGRÁFICA, é apresentada uma síntese da literatura científica sobre assuntos pertinentes ao entendimento e desenvolvimento desta pesquisa, como mecanismos de degradação de pavimentos asfálticos, a influência da cal hidratada nas propriedades mecânicas de concretos asfálticos, os mecanismos de modificação, bem como influência da incorporação de cal no envelhecimento do ligante asfáltico.

No terceiro capítulo, MATERIAIS E PROCEDIMENTOS LABORATORIAIS, são apresentados os materiais utilizados na pesquisa, assim como se descrevem os métodos de ensaios e procedimentos utilizados na fase experimental, com detalhamento dos trabalhos laboratoriais realizados.

A APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS constituem o capítulo 4. Todos os resultados laboratoriais são objeto de uma minuciosa análise.

Finalmente, no capítulo 5, CONCLUSÕES E SUGESTÕES são apresentadas as principais conclusões inferidas a partir dos resultados obtidos e algumas sugestões para trabalhos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Apresentam-se a seguir considerações importantes sobre pavimentação asfáltica e seus principais mecanismos de degradação, além disso, faz-se uma breve revisão sobre a utilização de cal hidratada em concretos asfálticos, seus mecanismos de modificação e sua influência nas propriedades mecânicas, de coesão/adesão e no envelhecimento.

2.1 PAVIMENTOS ASFÁLTICOS

Bernucci *et al.* (2006) definem pavimento como uma estrutura de múltiplas camadas de espessuras finitas, construída sobre a superfície final de terraplenagem, destinada técnica e economicamente a resistir aos esforços oriundos do tráfego de veículos e do clima, e a propiciar aos usuários melhoria nas condições de rolamento, com conforto, economia e segurança.

Nos pavimentos asfálticos submetidos a tráfego de médio a elevado, o revestimento é composto por concreto asfáltico, mistura asfáltica realizada à quente constituída de agregado graúdo, agregado miúdo, material de enchimento (fíler) e cimento asfáltico de petróleo (CAP). Seu preparo deve ser executado em usina apropriada, de forma que o CAP recubra totalmente os agregados. Após a usinagem, a mistura deve ser espalhada e compactada à quente de forma a atender as exigências constantes nas especificações (BIRMAN, 1982).

O revestimento asfáltico é a camada superior destinada a resistir diretamente às ações do tráfego e transmiti-las de forma atenuada às camadas inferiores, impermeabilizar o pavimento, além de melhorar as condições de rolamento (conforto e segurança).

Nos últimos anos, os pavimentos asfálticos brasileiros tem tido seu desempenho comprometido devido ao crescente aumento do tráfego (não apenas pelo maior número de veículos pesados, mas também o aumento da capacidade de carga dos mesmos) e da circulação com excesso de cargas (favorecida pela deficiente fiscalização e reduzido número de balanças nas rodovias).

Estes fatores juntamente com a carência de manutenção e projetos muitas vezes inadequados, que utilizam critérios obsoletos que não englobam todas as variáveis, fazem com que os pavimentos asfálticos sejam prejudicados expressivamente quanto à sua vida útil.

A degradação de pavimentos está associada a várias patologias, dentre elas podem ser citadas: deformações permanentes excessivas, trincamento por fadiga, trincamento por retração térmica e desagregação. As duas primeiras estão mais relacionadas com o tráfego atuante e a estrutura do pavimento, enquanto que as duas últimas estão relacionadas com as características dos materiais utilizados e as condições climáticas atuantes (SPECHT, 2004).

A seguir são apresentados e descritos alguns destes mecanismos de degradação que se manifestam nos pavimentos asfálticos, com principais causas e possíveis soluções.

2.2 MECANISMOS DE DEGRADAÇÃO DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS

O sucesso do revestimento asfáltico depende da obtenção de uma mistura com distribuição granulométrica adequada de agregados e de um teor ideal de ligante asfáltico, de modo a proporcionar conforto e segurança ao rolamento dos veículos, durabilidade, resistência às cargas, deformações, fraturas e desagregações, sem se tornar instável ao tráfego e às condições climáticas.

Os pavimentos são concebidos para durarem um determinado período. Durante cada um desses períodos ou ciclos de vida, o pavimento inicia numa condição ótima até alcançar uma condição ruim. Com o aumento do volume de tráfego, da carga por eixo e da pressão de pneus, muitos pavimentos têm apresentado falência prematura.

O decréscimo da condição ou da serventia do pavimento ao longo do tempo é conhecido como degradação do pavimento. Dentre os principais mecanismos de degradação que afetam o desempenho de um pavimento, dois requerem atenção especial, devido à magnitude que ocorrem e, principalmente, porque são problemas estruturais: 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 do revestimento asfáltico, que geralmente ocorre em pavimentos mais envelhecidos (ROBERTS *et al.*, 1991).

No estudo do comportamento das misturas asfálticas como materiais viscoelásticos é necessário considerar que os principais fatores que influenciam suas características são a temperatura e o tempo de aplicação da carga, como é demonstrado na Figura 1.

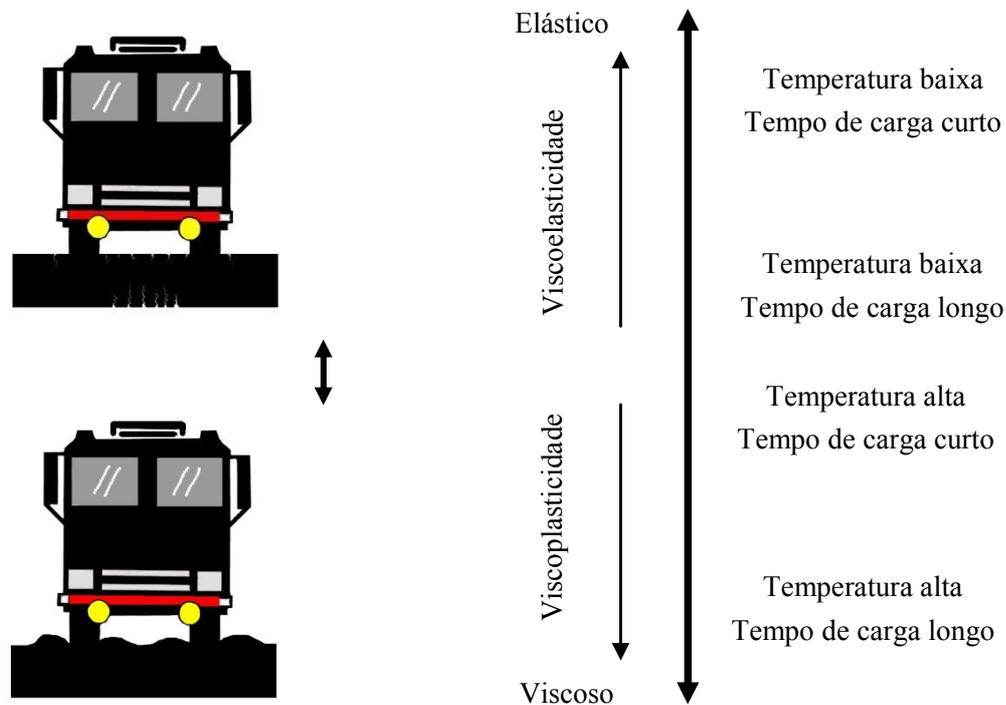


Figura 1: Comportamento das misturas asfálticas (Adaptado de FERNANDES JR., 1994)

Para temperaturas altas e/ou elevados tempos de aplicação de carga (velocidade dos veículos muito reduzida ou nula), o comportamento das misturas pode considerar-se mais próximo de um fluido viscoso. No entanto, a mesma mistura, apresentará um comportamento mais próximo de um sólido elástico, a temperaturas baixas e/ou com tempos de aplicação da carga reduzidos (circulação dos veículos a velocidades mais altas) (FERNANDES JR., 1994).

Considerando a variação dos parâmetros envolvidos no comportamento das misturas asfálticas distinguem-se quatro principais mecanismos de degradação:

1. **Trincamento a baixas temperaturas e tempos reduzidos de aplicação de carga:** Em condições de temperatura muito baixa e com tempo de aplicação de carga reduzido, pode-se considerar a mistura como um material elástico, com um elevado módulo, mas com comportamento frágil. Se a tensão de tração induzida pelo tráfego for demasiada, ocorrerá a formação de trincas.

2. **Trincamento por retração devido a variações térmicas:** A baixas temperaturas, as misturas tendem a sofrer uma diminuição de volume, ou seja, retração. Uma vez que as misturas, ao serem colocadas sem juntas, se encontram impedidas de movimentos horizontais, as variações térmicas conduzem a tensões de tração. Por outro lado, o módulo das misturas asfálticas aumenta à medida que a temperatura é reduzida, o que conduz a tensões mais elevadas 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;

3. **Trincamento por fadiga devido à ação do tráfego:** Quando a temperatura de serviço é baixa/média, a mistura comporta-se como um material viscoelástico em que domina o aspecto elástico. A mistura apresenta, nestas condições, um comportamento menos frágil, sendo capaz de suportar tensões de tração repetidas. No entanto, a repetida aplicação de tensões de tração devido à passagem de veículos pesados, conduz ao fim de um certo número de ciclos de carga/descarga à perda de resistência da mistura por fadiga, e consequentemente, o trincamento da camada.

4. **Deformações permanentes sob a ação do tráfego:** O módulo das misturas asfálticas diminui com o aumento da temperatura, havendo uma predominância da parcela viscosa em seu comportamento. Estas condições proporcionam o aparecimento de deformações permanentes na zona de passagem dos veículos sob a aplicação repetida das cargas (formação de trilhas de roda).

Trincamento por fadiga e deformações permanentes são os mecanismos de degradação que apresentam maior relevância principalmente em função das condições climáticas existentes no Brasil, pois ocorrem essencialmente para temperaturas altas ou moderadas, quando o pavimento apresenta um comportamento praticamente elástico (FERNANDES JR, 1994).

Fatores como má execução do projeto, problemas construtivos ou falha na seleção dos materiais pode levar à degradação prematura dos revestimentos. Causas de deterioração dos revestimentos a médio e longo prazo estão relacionadas à ação do tráfego (carga por eixo, tipo

de rodagem, pressão de enchimento dos pneus e tipo de suspensão) e às solicitações climáticas (variação de temperatura e teor de umidade). Somados a estes fatores têm-se ainda inadequações ou até mesmo a inexistência de programas de conservação e manutenção dos revestimentos, fatos que levam ao surgimento de defeitos mais severos nos pavimentos, prejudicando o conforto e principalmente a segurança dos usuários.

Na Tabela 1 é apresentada uma lista com a descrição dos principais defeitos que ocorrem nos revestimentos asfálticos e suas prováveis causas (adaptado de ROCHA e COSTA, 2009).

Tabela 1: Principais defeitos em revestimentos asfálticos

Defeito		Descrição	Prováveis causas
Trincas isoladas	Longitudinais	Apresenta direção predominante paralela ao eixo da via.	Junta de construção mal executada. Contração/dilatação do revestimento. Propagação de trincas de camadas subjacentes.
	Transversais	Apresenta direção predominante ortogonal ao eixo da via.	Contração/dilatação do revestimento. Propagação de trincas de camadas subjacentes.
Trincas interligadas	Jacaré Crocodilo	Assemelhando-se ao couro de jacaré ou crocodilo.	Ação repetida das cargas de tráfego.
	Bloco	Configuração próxima a um retângulo, podendo os blocos apresentar vários tamanhos.	Variações térmicas. União das trincas transversais e longitudinais.
Afundamentos	Plástico	Apresenta além da depressão na região das trilhas de roda um sollevamento lateral.	Ruptura das camadas do pavimento pela ação do tráfego.
	Consolidação	Caracteriza-se por uma depressão do revestimento na região das trilhas de roda.	Compactação insuficiente das camadas. Mistura asfáltica de baixa estabilidade. Infiltração de água nas camadas.
Ondulação/corrugação		Caracteriza-se por ondulações ou corrugações transversais na superfície do pavimento de caráter plástico e permanente.	Instabilidade da mistura betuminosa ou base. Excesso de umidade das camadas. Materiais estranhos na mistura. Retenção de água na mistura.
Deterioração de remendos		Região do pavimento onde ocorreu substituição do material original.	Tráfego intenso. Uso de materiais de má qualidade. Condições ambientais agressivas. Problemas construtivos.
Painéis		Cavidade que se forma num primeiro estágio no revestimento apresentando dimensões variadas.	Trincas por fadiga. Desgaste de alta severidade.

Além dos defeitos mencionados, observa-se ainda a presença de um defeito conhecido como perda de adesividade ou, em inglês, *stripping*. Em serviço, os pavimentos de CA estão sujeitos a mudanças das condições ambientais e ações das cargas oriundas do tráfego. Os fatores ambientais têm um papel importante no comportamento do pavimento, devido à presença de umidade, às oscilações de temperatura, e ao envelhecimento do ligante asfáltico.

Estes fatores combinados com as tensões impostas pelas cargas repetidas de tráfego podem gerar uma redução ou a quebra do vínculo entre o ligante asfáltico e o agregado devido à presença de umidade. Como o ligante é deslocado, a umidade atinge a superfície do agregado. Este fenômeno é conhecido como perda de adesividade ou, simplesmente, *stripping* (SEBAALY, 2007).

A suscetibilidade de misturas asfálticas à umidade é um problema complexo, que depende de fatores ambientais, práticas construtivas e características das misturas asfálticas. Os principais fatores que aceleram o aparecimento destes danos são o clima e o tráfego.

Conforme descrito por Furlan (2006), defeitos como a desagregação e a perda de adesividade (*stripping*) em revestimentos asfálticos, são normalmente atribuídos a problemas na ligação adesiva desenvolvida na interface agregado-ligante que, juntamente com as ações do tráfego e da água, contribuem para progressão dos danos, propiciando o aparecimento de buracos e panelas.

Mais adiante será comentada a influência da cal hidratada nas propriedades de adesão/coesão de concretos asfálticos, à luz da bibliografia internacional. Nos Estados Unidos muitos estados e agências de transporte especificam o uso de aditivos denominados *antistripping*, numa tentativa de aumentar a adesão na interface entre o agregado e o ligante asfáltico.

Atualmente, nas rodovias brasileiras, outro tipo de defeito tem sido observado com frequência cada vez maior, trata-se do *Top Down Cracking*. Tradicionalmente o processo de trincamento do revestimento asfáltico tem sua origem na parte inferior da camada, onde as tensões e flexões são mais significativas, e em seguida se propaga até a superfície. Na década de 1990, um novo mecanismo de trincamento começou a ser observado nos revestimentos, principalmente naqueles com espessas camadas asfálticas. Trata-se de um trincamento da camada de revestimento que ocorre de cima para baixo, esse mecanismo é conhecido como *Top Down Cracking* ou TDC.

O TDC ocorre principalmente devido a elevadas tensões cisalhantes horizontais causadas pelos pneus dos veículos pesados, especialmente quando trafegam com excesso de carga. O mecanismo é caracterizado pelo surgimento de trincamento próximo às trilhas de roda, devido à interação pneu pavimento, não considerado de forma realista nos métodos de dimensionamento (configuração simplificada de carregamento).

A maioria dos estudos realizados sobre TDC estão relacionados às causas de seu surgimento, poucos trabalhos dizem respeito a seu mecanismo de propagação.

Com base em observações de campo, Svasdisant *et al.* (2002) dividiram o desenvolvimento do TDC em três fases. A primeira fase, segundo os autores, consiste no aparecimento de uma pequena trinca longitudinal aparecendo do lado de fora da trilha de roda ou no seu interior. Com o tempo, na segunda fase, há um aumento das trincas iniciais e surgimento de novas trincas paralelamente à trinca original. Finalmente, na terceira fase começam a surgir trincamentos transversais que conectam as trincas, aumentando progressivamente a degradação do revestimento.

Su *et al.* (2008) concluíram que elevadas tensões cisalhantes atuam nas faces externas da área carregada (sob as paredes laterais dos pneus). Se estas tensões forem suficientemente elevadas, poderá ocorrer uma ruptura por cisalhamento próximo à área carregada, ruptura esta que resultará em deformações plásticas na camada asfáltica (ATR) e do surgimento de trincamentos superficiais de cima para baixo (TDC).

Apesar de ainda ser um mecanismo não totalmente compreendido até o momento, existem alguns fatores que contribuem de forma significativa no mesmo: amolecimento da camada superior do revestimento devido às elevadas temperaturas na superfície do revestimento; elevada pressão de inflação dos pneus; envelhecimento do ligante asfáltico na superfície do revestimento; e segregação da mistura asfáltica. Trabalhos publicados recentemente (WANG e AL-QADI, 2010) enfatizam que a principal causa do surgimento de TDC é a distribuição não uniforme de tensões próximo à superfície do pavimento.

O surgimento de trincas de cima para baixo facilita a penetração de água nas camadas do pavimento, prejudicando expressivamente uma das funções do revestimento asfáltico, impermeabilizar e proteger as camadas subjacentes. A presença de água e a passagem de cargas pesadas geram excesso de poro-pressão, bombeamento de finos e a progressiva desintegração das camadas asfálticas. Em um estágio posterior há um agravamento nos ATR e a formação de painéis. Por isso, há a necessidade de um melhor entendimento da atuação e propagação deste mecanismo nos pavimentos asfálticos para sua posterior quantificação no dimensionamento.

Outro fator importante a ser considerado é o envelhecimento de materiais asfálticos, sendo algumas considerações importantes apresentadas a seguir.

2.3 ENVELHECIMENTO DE LIGANTES ASFÁLTICOS

O ligante asfáltico utilizado em pavimentação pode sofrer oxidação devido a vários fatores, tais como a presença de oxigênio, exposição à radiação ultravioleta e variações de temperatura (HERRINGTON e BALL, 1996). Assim, durante a sua vida útil, o ligante asfáltico torna-se mais rígido e quebradiço, o que leva a formação de fissuras e degradação do pavimento. O processo de degradação do ligante asfáltico é chamado de envelhecimento.

Segundo diversos pesquisadores, o envelhecimento de ligantes asfálticos tem sido um dos principais responsáveis pela degradação dos revestimentos asfálticos. O envelhecimento provoca modificações na estrutura química do ligante acarretando alterações nas propriedades físicas, químicas e reológicas do material, que causam um aumento na sua consistência.

Um dos grandes desafios da pavimentação rodoviária é o envelhecimento precoce que pode ocorrer durante o processo de usinagem e aplicação das misturas asfálticas (TONIAL, 2001). O envelhecimento é um fenômeno irreversível que resulta da interação do ligante asfáltico com o meio ambiente durante a usinagem, a aplicação e a vida de serviço.

As alterações provocadas pelo envelhecimento contribuem para a degradação dos revestimentos manifestando-se inicialmente através da formação de trincas, podendo provocar descolamento de agregados, formação de painéis, entre outras patologias.

2.3.1 Etapas de envelhecimento

Segundo Lamontagne *et al.* (2002) o envelhecimento do ligante asfáltico ocorre principalmente em três etapas: Usinagem, aplicação e vida útil do revestimento.

A primeira etapa, e de maior impacto, ocorre na fabricação da mistura asfáltica: o ligante é aquecido a elevadas temperaturas (160 a 180°C) na presença de oxigênio, sob a forma de finas películas (5 a 15 μm) para entrar em contato com o agregado aquecido. Esta etapa representa cerca de 60% do envelhecimento.

A segunda representa cerca de 20% do total de envelhecimento e ocorre durante a estocagem, transporte, espalhamento e compactação da mistura. Durante esta etapa, principalmente durante o espalhamento e a compactação, o ligante asfáltico permanece em constante contato com o oxigênio e sob altas temperaturas.

Ao longo da vida útil do revestimento, terceira etapa, o envelhecimento se dá devido à ação do meio ambiente, representando cerca de 20% do envelhecimento total sofrido pelo ligante (MORILHA, 2004). Nesta etapa, o ligante está sujeito a temperaturas mais baixas, não ultrapassando 60-70°C na superfície do revestimento, porém continua envelhecendo, devido às condições climáticas e, indiretamente, à solicitação do tráfego.

Dentre estas três etapas, a parcela mais significativa do envelhecimento do ligante asfáltico ocorre na usinagem e aplicação, devido à perda de voláteis e oxidação superficial. Este processo pode ser minimizado através do controle da temperatura de usinagem, da adequada espessura de filme de ligante envolvendo os agregados, correspondente a um teor ótimo de ligante, e ainda pelo adequado teor de vazios (READ e WHITEAOK, 2003).

2.3.2 Mecanismos de envelhecimento

Whiteoak (1990) citado por Morilha (2004) descreve que são quatro os principais mecanismos responsáveis pelo envelhecimento do ligante asfáltico:

1. **Oxidação:** Como outras substâncias orgânicas, o ligante asfáltico oxida lentamente quando em contato com o ar. Durante o processo de usinagem, a presença de oxigênio, a grande superfície específica dos agregados e as altas temperaturas dentro do tambor-secador-misturador propiciam a oxidação;
2. **Perda de voláteis:** A evaporação de componentes voláteis depende da temperatura e das condições de exposição. Pode ser considerada baixa em ligantes asfálticos puros tendo em vista que estes têm baixos teores de voláteis;
3. **Endurecimento físico:** é um fenômeno reversível que acontece a temperatura ambiente, é atribuído à reorganização de moléculas e a cristalização de parafinas da fração saturada do ligante asfáltico (história térmica);
4. **Endurecimento exsudativo:** Resulta do movimento dos componentes oleosos que exsudam do ligante asfáltico para o interior do agregado mineral. É uma função tanto da tendência de exsudação do ligante quanto da porosidade do agregado.

Dentre esses mecanismos, a oxidação é o mais significativo, ocorre principalmente durante a aplicação do revestimento e continua, de forma mais lenta, durante seu período de uso.

Embora a estocagem do ligante asfáltico se faça a altas temperaturas, a oxidação nos tanques é minimizada pelo fato de não haver superfície exposta ao ar.

O grau de oxidação depende da temperatura, superfície exposta, tempo de exposição e da espessura da película de ligante asfáltico. Assim, durante a sua vida útil, o ligante asfáltico torna-se mais rígido e quebradiço, o que leva a formação de fissuras e degradação do pavimento. Dentre os fatores que influenciam estas reações e reestruturações decorrentes da oxidação do ligante asfáltico destacam-se as altas temperaturas no verão, a radiação UV, o tráfego intenso, o excesso de carga dos veículos e o teor de vazios após compactação do revestimento (WHITEOAK, 1990 *apud* MORILHA, 2004).

Como o ligante asfáltico envelhece, isto resulta em um aumento da rigidez deste ligante e, conseqüentemente, da mistura asfáltica. Este efeito tende a aumentar a resistência à formação das trilhas de roda da mistura e pode ser considerado como um efeito benéfico do envelhecimento. Por outro lado, o envelhecimento pode resultar no desenvolvimento e/ou aceleração de vários tipos de defeitos, tais como trincamento e fratura por fadiga, trincamento térmico e degradação devido ao desgaste e à umidade, podem levar à falência da estrutura do pavimento (WIEDER e FELLIN, 1994 *apud* MORILHA, 2004).

2.3.3 Procedimentos de ensaios para simulação do envelhecimento

Vários procedimentos acelerados de curto e longo prazo foram desenvolvidos por pesquisadores, com a finalidade de simular o envelhecimento em laboratório e assim avaliar as causas deste processo e seus efeitos em ligantes e em misturas asfálticas.

Atualmente duas técnicas para simular o envelhecimento de ligantes asfálticos em laboratório são as mais utilizadas. A primeira, denominada em inglês como *Rolling Thin Film Oven Test* (RTFOT), no Brasil conhecido como ensaio do efeito do calor e do ar (ABNT NBR 14736/2001) simula o envelhecimento do ligante asfáltico durante o processo de usinagem. Para isto, é realizado em altas temperaturas e na presença de oxigênio.

A segunda técnica, chamada de *Pressure Aging Vessel* (PAV), foi desenvolvida pelo *Strategic Highway Research Program* (SHRP) para simular o envelhecimento do ligante asfáltico *in situ* ou seja, durante a sua utilização como pavimento. Este ensaio é realizado sob elevada pressão, baixa temperatura e longos tempos, podendo simular até décadas (SILVA, 2005).

Após a simulação, o ligante asfáltico envelhecido pode ser avaliado segundo várias técnicas de análise instrumental, desde as mais simples, ditas clássicas, utilizadas para fins de especificação, até as mais complexas, úteis na elucidação e entendimento do comportamento do ligante asfáltico.

Os ensaios clássicos de caracterização e especificação de ligantes asfálticos consistem na determinação da penetração a 25°C, na determinação da temperatura de amolecimento anel e bola e na determinação da viscosidade rotacional *Brookfield*.

Outras análises utilizadas para uma caracterização mais completa do ligante asfáltico são: a cromatografia em coluna de sílica, que identifica e quantifica as suas frações químicas genéricas SARA (Saturados, Aromáticos, Resinas e Asfaltenos); a Cromatografia por Permeação em Gel “ultra-rápido” (GPC ultra-rápido), que separa os compostos por massa molar; a espectroscopia de infravermelho (FTIR), que identifica os compostos formados na oxidação; e, finalmente, a Reometria de Cisalhamento Dinâmico (DSR), que permite observar as variações do comportamento viscoelástico do material envelhecido (SILVA, 2005).

Avaliações de envelhecimento do ligante asfáltico também podem ser realizadas submetendo amostras de misturas asfálticas à imersão em água a determinadas temperaturas por um período de tempo predefinido. Adicionalmente pode-se ainda submeter as mesmas amostras a um período de exposição ao calor e circulação de ar em estufa.

Nesta pesquisa foram utilizados dois métodos para avaliar o envelhecimento do ligante asfáltico, um em amostras de ligantes e outro em amostras de misturas asfálticas. No item seguinte são descritos os mecanismos de interação da cal hidratada em misturas asfálticas, dentre eles os efeitos sobre o envelhecimento.

Diversos estudos apontam a cal incorporada em concretos asfálticos como sendo capaz de reduzir envelhecimento da mistura pela interação com compostos polares reativos do ligante, apresentando uma grande afinidade com as moléculas orgânicas. Uma vez que as moléculas polares presentes contribuem para a rigidez do ligante, é provável que a presença da cal na mistura tenha uma influência positiva nas propriedades da mesma.

2.4 CAL – ORIGEM, APLICAÇÕES E PERSPECTIVAS

Neste item são apresentadas, de forma resumida, algumas informações relevantes sobre a cal, sua origem, importância e áreas de aplicação.

2.4.1 Origens

A cal pode ser considerada o produto manufaturado mais antigo da humanidade. Pode-se constatar a existência de testemunhos relacionados ao uso dos calcários e dos seus produtos derivados em obras grandiosas e nos empregos domésticos (ABPC, 1990).

A cal é um dos materiais de maior importância para a sociedade atual. Nenhuma outra substância encontra tantas aplicações quanto ela. Embora seja conhecida pelas civilizações (egípcia, grega e romana) sua produção e seu uso foram deixados de lado por alguns séculos, sendo redescobertos no fim da Idade Média.

Os egípcios há 5.000 anos, já incorporavam cal e gipsita calcinada na construção de suas pirâmides, usaram a cal como um ingrediente da argamassa e do gesso. Os romanos, há 2.000 anos, misturavam areia com finas camadas de terra e cinza vulcânica de Pozzuoli, para produzir um forte e resistente composto de cimento e água salgada para uso na construção de edificações e blocos de concreto.

No Brasil a indústria de cal iniciou suas atividades na época colonial, em 1549, quando da instalação das primeiras “caieiras” para a fabricação de cal virgem a partir de conchas marinhas, para as argamassas de revestimento e pinturas do casario da cidade de Salvador da Bahia. A colonização portuguesa levou para o interior do território brasileiro a arte de fabricar cal, principalmente para proteger das copiosas chuvas tropicais as paredes de barro, armado ou socado, de suas moradias e fortificações (GUIMARÃES, 1990).

Daí até a década de 1930 a fabricação de cal no Brasil foi voltada, principalmente, para as obras de construção civil e, mais subordinadamente, para as indústrias de açúcar, tratamento de águas potáveis e de couro. O grande surto da construção civil, o crescimento da indústria do açúcar, o aparecimento da indústria de celulose e da “grande” siderurgia no mercado, como portentosos e exigentes usuários da cal, levaram, a partir da década de 1950, a indústria brasileira de calcinação de calcários/dolomitos para um estágio de rápido desenvolvimento tecnológico e produtivo (ABPC, 1990).

2.4.2 Classificação

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; geralmente muito antiga (pré-cambriana) e pureza variável. As provenientes de calcários sedimentares e de conchais naturais recentes participam de maneira subordinada na produção (ABPC, 1990).

O principal produto da calcinação das rochas carbonatadas cálcicas e cálcio-magnesianas é a cal virgem, também denominada cal viva e cal ordinária. O termo cal virgem é o consagrado, na literatura brasileira e nas normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT, para designar o produto composto predominantemente por óxido de cálcio ou por óxido de cálcio e óxido de magnésio, resultantes da calcinação, à temperatura de 900 – 1200°C, de calcários, calcários magnesianos e dolomitos.

É classificada, conforme o óxido predominante, em: Cal Virgem Cálcica ou Calcítica quando possui valores de óxido de cálcio entre 100% e 90% do óxido total presente; Cal Virgem Magnésiana quando possui teores intermediários de óxido de cálcio, entre 90% e 65% do óxido total presente; e Cal Virgem Dolomítica quando o teor de óxido de cálcio está entre 65% e 58% do óxido total presente.

No mercado global da cal, a cal virgem cálcica ou calcítica predomina, particularmente, pela sua aplicação nas áreas das indústrias siderúrgicas, de açúcar e de celulose.

Outro tipo de cal muito comum no mercado é a cal hidratada que é um pó de cor branca resultante da combinação química dos óxidos anidros da cal virgem com a água. A cal hidratada é o tipo de cal mais usado na construção civil.

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.

Isto significa que se o consumidor quiser uma cal mais "pura" ele deve adquirir uma CH I, já que para ser definida desta maneira, seus resultados obedecem a limites acima dos exigidos para a CH III. O tipo CH II seria o meio termo. Quanto à concentração de Cálcio e Magnésio pode ser classificada em Cálcica ou Calcítica quando $\% \text{CaO} > 90 \%$ ou Magnésiana quando $65\% < \% \text{CaO} < 90\%$ e em Dolomítica quando $\% \text{CaO} < 65\%$.

Os dois tipos de cal utilizadas nesta pesquisa são classificadas em: Cal hidratada Cálcica ou Calcítica do tipo CHI e Cal Dolomítica do tipo CHII.

2.4.3 Produção de cal no Brasil

As reservas de calcários e dolomitos são disseminadas pela maior parte dos continentes. No Brasil as reservas de rochas calcárias, de dolomitos e conchas calcárias são superiores a 40 bilhões de toneladas, distribuídos pelos 26 Estados e Distrito Federal.

O consumo brasileiro de calcários, dolomitos e conchas calcárias é da ordem de 58 milhões de toneladas por ano (BRASIL, 2009). Cerca de 73% da produção é realizada no Sudeste, onde se concentram os maiores produtores, principalmente em Minas Gerais, logo a seguir vem os estados de São Paulo, Rio de Janeiro e Espírito Santo.

Na Região Sul, que participa com 14% do mercado produtor brasileiro, a grande produção se origina no Estado do Paraná. Na região Nordeste, encontra-se 6% da oferta brasileira de cal. O restante da produção está distribuída pelo restante do território, na maioria dos casos com produções em pequena escala (BRASIL, 2009).

Nota-se, atualmente, uma descentralização da indústria com o surgimento de usinas produtoras de cal em quase todo o território nacional. Fora das regiões Sul e Sudeste registra-se também produção de cal a nível empresarial no Ceará, Rio Grande do Norte e Maranhão, tendo em vista a disposição geográfica e a qualidade das reservas de calcário/dolomitos.

No Rio Grande do Sul, a produção de cal é feita principalmente no município de Caçapava do Sul, onde uma empresa, com capacidade de produção anual de 144 mil toneladas de cal, abastece cerca de 70% do mercado estadual. Segundo a ABPC- Associação Brasileira de Produtores de Cal, o Mercado Brasileiro de Cal contabilizou em 2008 uma produção acima de 7 milhões de toneladas do produto, o que manteve o Brasil na 5ª posição entre os países produtores.

Nos últimos anos a estrutura da produção da Cal vem se mantendo praticamente inalterada, com a fração ou parcela da Cal Virgem correspondendo a 68% da produção nacional e a Cal Hidratada representando 32%.

Na Figura 2 estão representadas as reservas (R) de calcários e dolomitos no Brasil no ano de 1990 em milhões de toneladas (GUIMARÃES, 2002). Em geral, na região sul-sudeste predominam as cales provenientes de dolomitos e calcários magnesianos e na região nordeste-norte-centro as resultantes de calcários.

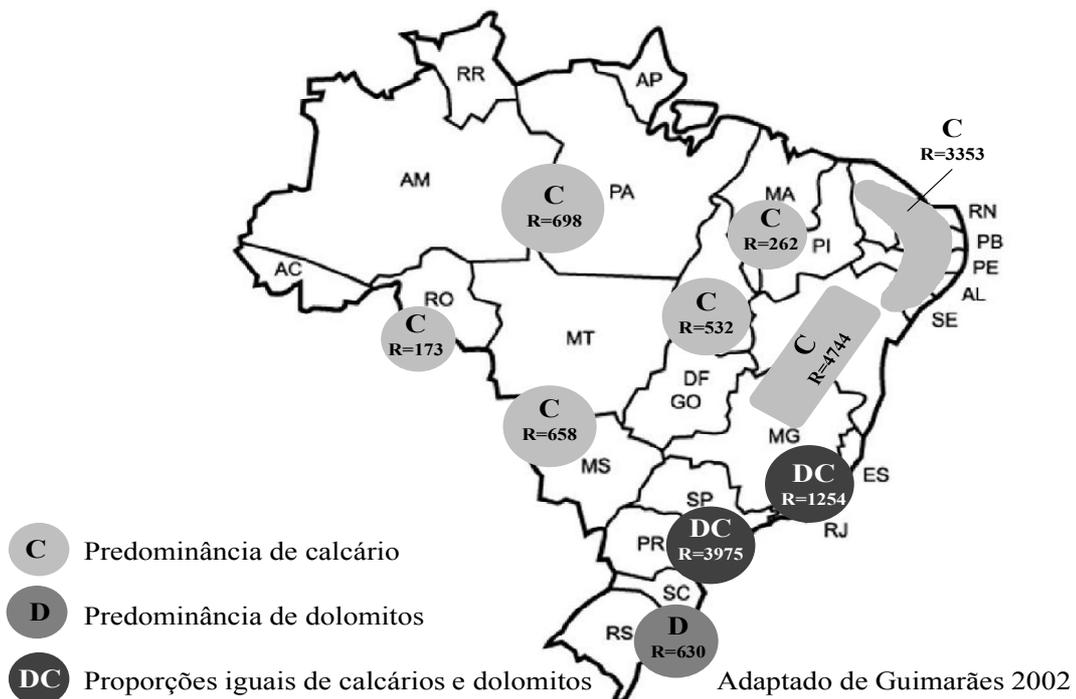


Figura 2: Reservas de Calcários/Dolomitos no Brasil -1990 em milhões de toneladas

O consumo per capita brasileiro girando em torno de 40 kg/hab/ano, apesar de acima da média mundial, está bem afastado da média dos países desenvolvidos. O consumo per capita mundial de CAL nos últimos anos gira em torno de 30 kg/hab/ano. Entre os maiores consumidores per capita do mundo, segundo o *Mineral Industry Surveys*, citam-se: Bélgica (193), Alemanha (130), Polônia (119), Rússia (112 kg/hab/ano) (BRASIL, 2009).

Países industrializados tem na metalurgia a principal fonte de consumo de cal, porém é a construção o setor de consumo mais tradicional, não só pela produção de argamassas, mas pelo desenvolvimento de materiais sílico-calcários e a florescente atividade de pavimentação de estradas e estabilização solo-cal, particularmente nos países com solos lateríticos (GUIMARÃES 2002).

Segundo dados de consumo, no mercado brasileiro há ainda elevada margem para crescimento do emprego da cal na estabilização de solos, na produção de misturas asfálticas, no tratamento de águas residuais, na fabricação de vidros, na agricultura, entre outros.

2.4.4 Principais Aplicações

Quando realmente analisamos a fundo as aplicações da cal é que nos damos conta da magnitude de sua importância. Ela está presente em quase tudo que rodeia o ser humano: papel, açúcar, alumínio, carbureto de cálcio, soda cáustica, barrilha (carbonato de sódio), couro, defensivos agrícolas, nas águas tratadas que abastecem as grandes cidades, na proteção do meio ambiente, em produtos siderúrgicos e farmacêuticos, alimentícios e muitos outros.

Mas é na construção civil que é mais conhecida, pelo uso nas argamassas, nas pinturas, na estabilização de solos, nas misturas asfálticas e nos blocos de tijolos construtivos.

Pela multiplicidade de suas aplicações a cal (virgem ou hidratada) está entre os dez produtos de origem mineral de maior consumo mundial. O produto ganha ainda maior expressão quando se observa o amplo leque de setores industriais e sociais que dele se utilizam, graças à dupla capacidade: reagente químico e aglomerante-ligante. Na Figura 3 são apresentados os percentuais de contribuição de algumas áreas de consumo de cal no ano de 2008.

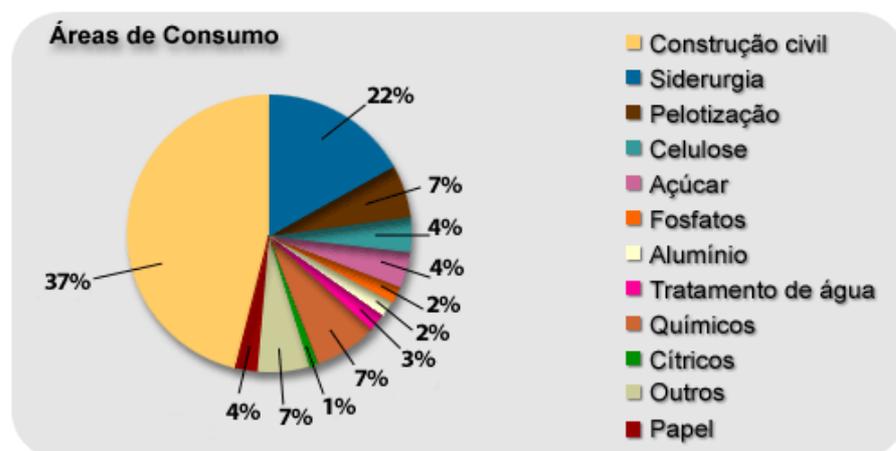


Figura 3: Principais áreas de consumo de cal no Brasil em 2008 segundo ABPC

O compromisso da Engenharia Civil com o desenvolvimento do País permite que se anteveja no Brasil cenário semelhante ao das nações desenvolvidas quanto ao emprego da cal, com a criação de expressivos mercados em setores que ainda necessitam de pesquisa e desenvolvimento, como a pavimentação asfáltica, na qual a utilização de cal hidratada vem ganhando destaque nos últimos anos.

2.4.5 Perspectivas de desenvolvimento dos mercados

Enquanto os países desenvolvem seus complexos industriais, frequentemente passam a ignorar as indústrias básicas, como a da cal. O produto se torna uma mercadoria de preço baixo e poucos reconhecem sua importância.

A Humanidade não pode sobreviver sem o uso da cal. Virtualmente, todos os processos de manufatura industrial, biológico e químico, criam subprodutos ácidos ou formadores de ácidos. Somente a cal torna estes resíduos inertes e não contaminantes.

Embora na siderurgia, historicamente um mercado muito expressivo, o consumo do produto venha apresentando quedas expressivas, devido a reutilização de materiais (sucatas) ao invés da extração e processamento de minérios brutos, no setor ambiental há uma crescente demanda da utilização da cal em processos como tratamento de resíduos industriais, limpeza de gases oriundos da queima de combustíveis com enxofre (responsáveis pelas chuvas ácidas causadas por emissões destes mesmos gases e aqueles emitidos pelos escapamentos dos veículos).

Outra aplicação importante da cal no meio ambiental é o tratamento e a conversão de dejetos animais e humanos em fertilizantes que não contaminam o meio ambiente. Aplicações ambientais continuarão crescendo, para minimizar a contaminação do planeta. A cal trata quase todos os resíduos transformando-os em materiais estáveis e sem efeito negativo para o meio ambiente.

Pesquisas e novas utilizações estão em grande expansão, usos na medicina, através da substituição de ossos doentes ou lesados por gesso medicinal com cal é uma novidade. O uso potencial de cerâmicas de alta tecnologia na engenharia de motores de carros e de aviões é uma ótima surpresa.

O novo século irá revelar muitas outras aplicações para este valioso material. Apesar de ser considerado o produto manufaturado mais antigo da humanidade, são cada vez mais frequentes as descobertas de novas aplicações para cal (GUIMARÃES, 2002).

2.5 UTILIZAÇÃO DE CAL HIDRATADA EM MISTURAS ASFÁLTICAS

2.5.1 Contexto histórico

Em consequência da queda geral da qualidade dos ligantes asfálticos nos EUA devido à crise do petróleo de 1973, os danos por umidade e trincamentos térmicos (resultantes do congelamento dos pavimentos) se tornaram os modos de degradação mais graves à época (KANDHAL e RICKARDS, 2001).

Com o agravamento destes mecanismos de degradação, diversos aditivos para misturas asfálticas disponíveis para limitar os danos induzidos por umidade foram exaustivamente testados tanto em laboratório quanto em campo. Neste contexto, o emprego da cal hidratada em concretos asfálticos experimentou um forte interesse, pois foi definida como sendo o aditivo mais eficaz para minimizar a degradação prematura dos pavimentos (HICKS, 1991).

Atualmente é comprovado cientificamente que a cal hidratada tem diversos efeitos benéficos sobre os concretos asfálticos. A cal é vista não somente como um aditivo para prevenção de danos causados pela umidade, mas também como um agente melhorador multifuncional, reduzindo o envelhecimento químico do ligante asfáltico e melhorando o desempenho dos pavimentos no que diz respeito ao trincamento por fadiga e deformação permanente.

Este assunto tem sido intensamente estudado e aplicado nos EUA, onde a cal é especificada em muitos estados, estima-se que 10% dos concretos asfálticos produzidos no EUA têm incorporação de cal hidratada (HICKS e SCHOLZ, 2003).

A experiência europeia na utilização da cal em misturas asfálticas ainda não está tão desenvolvida como nos EUA, mas seus efeitos benéficos na durabilidade dos concretos asfálticos também têm sido amplamente divulgados.

Um exemplo disso é a ação de uma concessionária francesa que especifica a abordagem do assunto em uma série de cursos que realiza, pois observou que misturas modificadas com cal apresentavam uma durabilidade de 20% a 25% maior (RAYNAUD, 2009 *apud* EULA, 2010).

Observações semelhantes levaram a Holanda a especificar o emprego de cal hidratada em revestimento poroso, presentes atualmente em 70% das rodovias no país.

Como resultado da disseminação dos seus potenciais, a cal hidratada está sendo cada vez mais utilizada em concretos asfálticos na maioria dos países europeus, especialmente na Áustria, França, Holanda, Reino Unido e Suíça (VOSKUILEN *et al.*, 2003; HAGOS *et al.*, 2009 *apud* EULA, 2010).

Infelizmente, no Brasil o emprego de cal hidratada na pavimentação é menos usual, e suas funcionalidades ainda são bastante desconhecidas. Até bem pouco tempo, a cal era usada somente como material de enchimento (fíler), sem avançar-se na discussão sobre a sua qualidade e os efeitos de sua incorporação no desempenho de misturas de CA.

Atualmente, a difusão de pesquisas realizadas nos mais conceituados centros de pesquisa do país tem proporcionado a transmissão dos conhecimentos sobre as potencialidades da utilização da cal hidratada em CA, além da abertura de novas linhas de pesquisa, que proporcionam um avanço no entendimento dos mecanismos pelos quais a cal age sobre o desempenho das misturas com ela produzidas.

Um reflexo do avanço deste entendimento e difusão dos resultados está na especificação dos Contratos de Restauração e Manutenção (CREMA) do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) nos quais é exigida a utilização de cal hidratada na formulação dos CA, porém sem mencionar-se ainda nada sobre a qualidade do produto utilizado, o que sabemos que afeta significativamente o desempenho final do CA.

2.5.2 Mecanismos de modificação

Os mecanismos pelos quais a cal hidratada modifica misturas asfálticas são ainda um tanto desconhecidos. Na literatura encontram-se alguns resultados mostrando que a cal hidratada tem de fato diversos efeitos, alguns com conseqüências no envelhecimento, outros em termos de propriedade mecânicas e na adesividade ligante-agregado. As razões pelas quais a cal hidratada tem demonstrado grande eficácia em misturas asfálticas estão nas fortes interações entre os principais componentes, ou seja, agregado mineral e ligante asfáltico.

Segundo Ishai e Craus (1977), a cal hidratada modifica as propriedades superficiais do agregado (Figura 4), permitindo o desenvolvimento de uma composição de superfície e rugosidade mais favoráveis à adesão do ligante. Além disso, a cal hidratada pode tratar partículas argilosas aderidas à superfície do agregado, inibindo seu efeito prejudicial.

A maioria dos métodos para adicionar cal hidratada consiste em colocá-la diretamente no agregado graúdo, seco ou úmido, às vezes com marinação. Isso demonstra que a modificação da superfície do agregado é um aspecto fundamental na modificação das misturas.

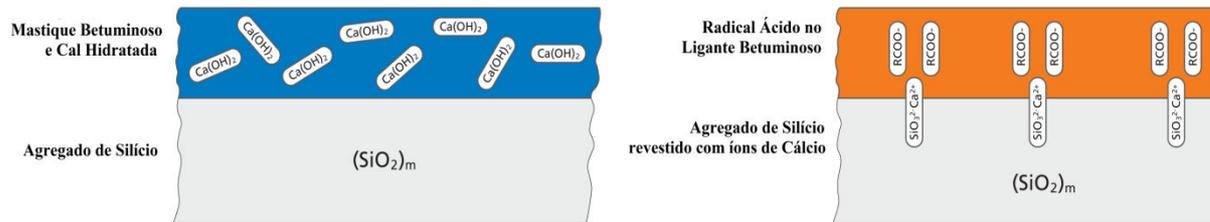


Figura 4: Efeito da cal na superfície do agregado (adaptado de ISHAI e CRAUS, 1977)

A elevada porosidade da cal hidratada pode explicar seu efeito no enrijecimento da mistura, como relatado na literatura, ocorrendo um aumento de módulo de resiliência (misturas mais rígidas sem tanta suscetibilidade ao trincamento) efeito este nem sempre observado. Posteriormente, constatou-se um aumento de módulo dependente da temperatura, sendo a cal mais eficiente em temperaturas elevadas, onde as deformações permanentes são dominantes.

A cal hidratada apresenta uma maior porosidade seca (vazios de *Rigden*) do que outros fileres minerais, com valores típicos entre 60 e 70% enquanto fileres minerais têm valores próximos a 30-34% (Figura 5). A diferença vem da elevada porosidade das partículas da cal hidratada.

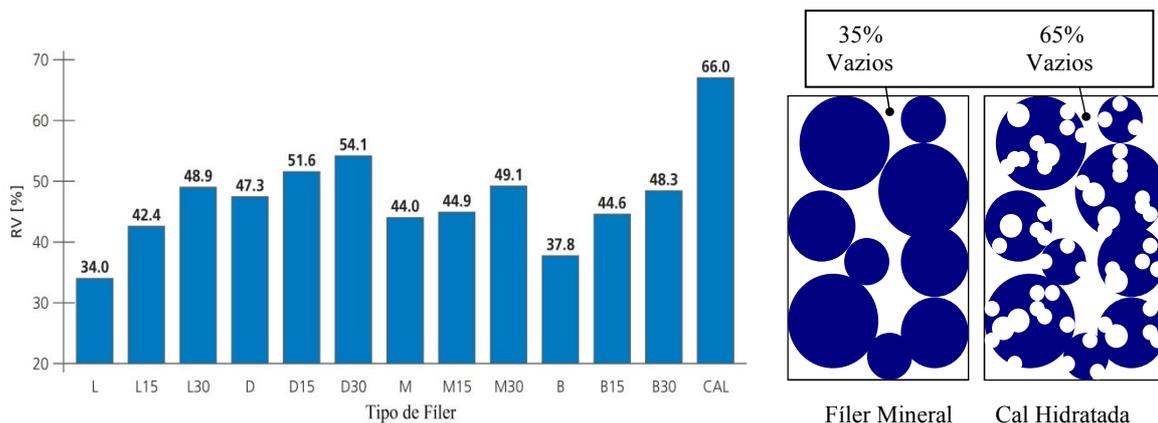


Figura 5: Vazios de Rigden para diversos tipos de fileres (GRABOWSKI *et al.*, 2009)
 L: Calcário, D: Dolomita, M: Melaphyr (Basalto alterado), B: Basalto, CAL: Cal hidratada,
 X15: Filer com 15% Cal hidratada, X30: Filer com 30% Cal hidratada

No filer mineral, a porosidade, essencialmente, vem dos vazios entre as partículas. Para cal hidratada, a porosidade no interior das partículas soma-se à porosidade entre as partículas, levando a um valor muito maior.

Portanto, o efeito do endurecimento provocado pela cal hidratada em temperaturas mais elevadas pode ser explicado, pelo menos em parte, pela maior porosidade de suas partículas (GRABOWSKI *et al.*, 2009).

Ao ser adicionada, a cal reage com os agregados, fortalecendo o vínculo entre estes e o ligante asfáltico. Ao mesmo tempo em que trata os agregados, a cal também reage com as moléculas fortemente polares do ligante, inibindo a formação de sabões solúveis em água, que causariam descolamentos. As interações químicas entre a cal hidratada e os grupos de ácidos do ligante contribuem tanto para o aumento da resistência ao envelhecimento quanto para melhorar a adesividade das misturas modificadas. Além disso, a dispersão de minúsculas partículas de cal hidratada na mistura torna-a mais rígida e mais resistente, reduzindo a probabilidade de o vínculo entre o ligante asfáltico e os agregados ser quebrado mecanicamente, mesmo sem a presença de água (EULA, 2010).

Por todas estas razões, as interações entre a cal hidratada e os outros componentes da mistura asfáltica são bastante intensos, explicando melhorias tão distintas como na resistência à umidade, no envelhecimento e propriedades mecânicas das misturas.

2.5.3 Influência nas propriedades de concretos asfálticos

Como descrito anteriormente, o interesse pela utilização da cal hidratada na pavimentação asfáltica ocorreu nos EUA na década de 1970, focada em seu efeito benéfico como melhorador de adesividade. Nos EUA a cal hidratada é considerada o mais eficaz agente *antistripping* disponível, e é amplamente especificada pelos estados com graves problemas de adesividade.

Dada a sua ampla utilização nos últimos 40 anos nos EUA, a cal hidratada tem sido vista não somente como um aditivo para prevenção de danos causados pela umidade, mas também como um aditivo multifuncional que melhora a durabilidade de concretos asfálticos (LITTLE *et al.*, 2006; SEBAALY *et al.*, 2006/2007).

As várias maneiras de adicionar, ou seja, como material de enchimento (fíler), seca sobre agregado graúdo, como lama de cal, com ou sem marinação são descritas na literatura. Porém, não há evidências definitivas que demonstrem que um método é mais eficaz que o outro, e todos os métodos são vistos como possíveis de permitir que os efeitos benéficos da cal hidratada possam se desenvolver.

Contudo, quando se visa melhorias na adesividade, os efeitos são mais pronunciados quando adicionada sobre o agregado graúdo, devido a sua interação e modificação da superfície do agregado, promovendo características mais favoráveis para a adesão do ligante asfáltico.

Levando em consideração que todas as propriedades da mistura têm impacto na durabilidade dos revestimentos, a incorporação de cal hidratada tem uma forte influência na mesma. A experiência de campo de órgãos estatais norte-americanos permite estimar que a cal hidratada adicionada à uma taxa de 1,0% a 1,5 % na mistura (baseado no peso do agregado seco) aumenta a durabilidade dos revestimentos de 2 a 10 anos (20% a 50%) (EULA, 2010).

Geralmente, a influência da cal hidratada no desempenho e na durabilidade dos concretos asfálticos é avaliada através de ensaios mecânicos antes e depois de algum tipo de condicionamento das amostras.

Alguns autores observaram que, rapidamente, a cal hidratada age modificando as misturas, que tendem a apresentar um aumento de resistência e módulo quando comparadas com as misturas que não foram modificadas com sua adição.

Devido às diferentes formas de ruptura e modos de degradação que as misturas asfálticas podem sofrer em campo, é, de certa forma, complicado medir sua durabilidade em laboratório. Ainda assim, métodos de ensaio estão disponíveis para avaliar a resistência dos materiais de pavimentação à ação de agentes prejudiciais, tais como imersão em água, ciclos de congelamento e descongelamento, influência da temperatura e exposição a raios UV (responsáveis pelo envelhecimento) e/ou ação do tráfego.

A seguir são apresentados alguns relatos encontrados na literatura sobre o efeito da cal hidratada em concretos asfálticos no que se refere a:

- a) Resistência ao envelhecimento químico;
- b) Danos causados pela umidade e temperatura na resistência e desempenho das misturas asfálticas (congelamento/descongelamento);
- c) Influência nas propriedades mecânicas, tais como módulo de resiliência, resistência à tração e deformação permanente.

Embora esses ensaios laboratoriais permitam comparações entre materiais e misturas, praticamente não fornecem informações diretas sobre sua durabilidade no campo. Enquanto o trincamento por fadiga e os afundamentos nas trilhas de roda podem ser usados em métodos de projeto do pavimento, os danos causados pela umidade e o envelhecimento são difíceis de traduzir para a durabilidade *in situ* (EULA, 2010).

2.5.3.1 Resistência ao envelhecimento químico

No início, a cal hidratada era adicionada a concretos asfálticos com o propósito de diminuir o envelhecimento químico do ligante asfáltico, melhorando assim a adesividade agregado-ligante. As primeiras observações do efeito antienvelhecimento de cal hidratada em materiais betuminosos datam do final dos anos 1960, quando se observou que amostras de ligantes recuperados de misturas asfálticas tratados com cal hidratada apresentavam maior flexibilidade que as amostras não tratadas (CHACHAS *et al.*, 1971; JOHANSSON, 1998).

A partir de então, diversos estudos de laboratório e de campo confirmaram o efeito da cal hidratada no envelhecimento químico de ligantes (PLANCHER, 1976; PETERSEN, 1987; JOHANSSON, 1996 *apud* EULA, 2010). A constatação deste efeito em campo é de certa forma complicada, por causa da dificuldade de recuperar o ligante envelhecido.

Como o envelhecimento é mais intenso no topo da camada superior, nos primeiros centímetros (ou até milímetros), é daí que o ligante deve ser extraído, a fim de quantificar a intensidade do envelhecimento. Devido à dificuldade de extração apenas nessa camada delgada próxima à superfície, em alguns casos, analisa-se toda a camada asfáltica, com espessura de vários centímetros. Isto reduz a representatividade dos resultados, pois acaba-se misturando ligantes com diferentes graus de envelhecimento.

Em muitos ligantes asfálticos, a adição de cal hidratada promove uma redução da taxa de oxidação e envelhecimento. Este é um resultado das reações químicas que ocorrem entre o hidróxido de cálcio e as moléculas altamente polares do betume. Dessa forma a cal modifica os ligantes asfálticos, reduzindo sua sensibilidade ao envelhecimento (JOHANSSON *et al.*, 1995; VERHASSELT *et al.*, 2001 *apud* EULA, 2010).

Este efeito é ocasionado por um lento aumento da viscosidade (ou quaisquer outras propriedades mecânicas) em função do tempo de envelhecimento (Figura 6).

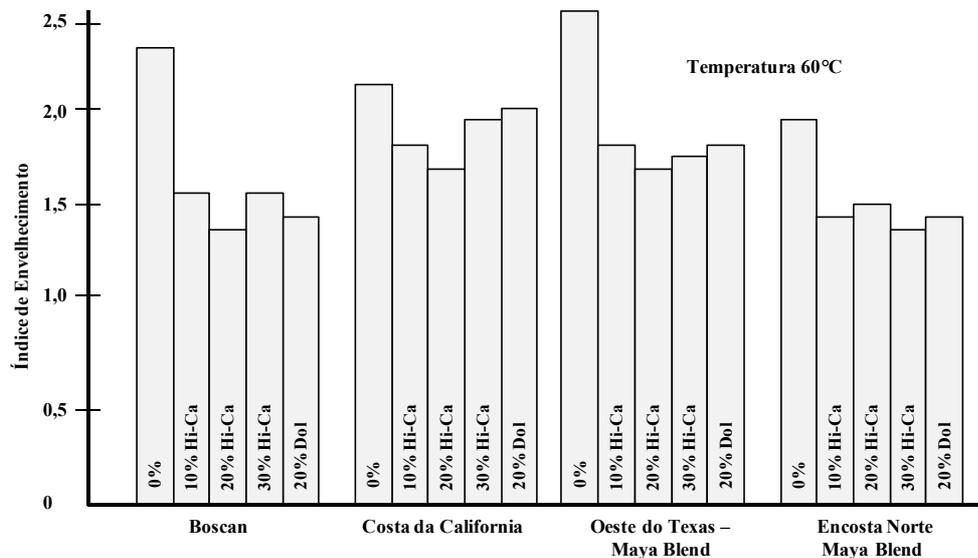


Figura 6: Índice de envelhecimento (viscosidade após envelhecimento/viscosidade antes do envelhecimento) para misturas com e sem cal hidratada TFAAT a 60°C (*Thin Film Accelerated Aging Test*) (PETERSEN *et al.*, 1987)

Nota-se na Figura 6 que as misturas com incorporação de cal hidratada apresentam um índice de envelhecimento (*Aging Index*) menor em comparação com as misturas sem cal.

Como já descrito anteriormente e observado por vários autores (PLANCHER *et al.*, 1976; PETERSEN *et al.*, 1987; SEBAALY, 2006) as moléculas polares neutralizadas pela ação da cal hidratada permanecem fortemente fixadas sobre as partículas de cal hidratada. Isso as impede de reagir, reação essa que teria como consequência o envelhecimento químico do ligante. Dessa forma há uma cinética global mais lenta neste envelhecimento.

Essas moléculas polares neutralizadas pelas partículas de cal hidratada são também impedidas de se deslocar para a interface agregado-ligante. Como consequência, somente os restantes tensoativos não ácidos do ligante, baseados tipicamente em aminas e que não se deslocam facilmente pela presença de água, se deslocam para essa interface (CURTIS, 1993).

Conclui-se que as interações químicas entre a cal hidratada e os grupos de ácidos do ligante contribuem tanto para o aumento da resistência ao envelhecimento quanto para melhorar a adesividade das misturas modificadas.

2.5.3.2 Dano por umidade induzida

Para combater o problema de danos causados pela umidade tem-se especificado aditivos *antistripping*, numa tentativa de aumentar a adesão na interface agregado-ligante e eliminar a sensibilidade à umidade da mistura de CA.

A ligação entre ligante-agregado é uma propriedade fundamental dos concretos asfálticos que não pode ser avaliada com ensaios individuais nos componentes, ou seja, ligante ou agregado.

Uma consideração importante ao se avaliar um aditivo *antistripping* é sua capacidade de manter as propriedades do CA, em outras palavras, o aditivo não deve, ao eliminar o problema de sensibilidade à umidade, prejudicar outras propriedades da mistura.

Por exemplo, um aditivo *antistripping* deve manter a flexibilidade da mistura em temperaturas baixas e intermediárias e sua estabilidade em altas temperaturas (SEBAALY, 2007).

Sebaaly (2007) divide os aditivos *antistripping* em dois grandes grupos:

- Aditivos líquidos: são formados por substâncias químicas que atuam na superfície do agregado reduzindo sua tensão superficial promovendo uma melhor aderência. O ligante asfáltico é utilizado como veículo desses aditivos. No entanto, com este método, apenas uma porção de líquido entra em contato com a superfície do agregado.
- Cal hidratada: pode ser aplicada tanto na forma seca quanto na forma de lama. A cal hidratada tende a mudar a química da superfície ou polaridade molecular da superfície do agregado. O resultado é uma forte adesão na interface entre o agregado e ligante.

A resistência do CA aos danos causados pela umidade é muito importante para seu desempenho a longo prazo. Os danos causados pela presença de umidade se manifestam através de uma redução na resistência ou rigidez da mistura. Portanto, se um concreto asfáltico é suscetível a danos causados pela umidade, ela pode ser eventualmente afetada por algum dos principais mecanismos de degradação, ou seja, deformação permanente, fadiga, trincamento térmico ou desgaste excessivo.

Investigações laboratoriais e de campo têm mostrado efeitos positivos da cal em concretos asfálticos. Juntamente com aminas e cimento Portland, a cal hidratada mostrou-se mais eficaz que polímeros no combate ao dano por umidade (HICKS, 1991).

Na literatura são encontrados diversos trabalhos científicos (TERREL e AL-SWAILMI, 1994; LITTLE e EPPS, 2001; LITTLE e PETERSEN, 2005) que têm mostrado que a incorporação de cal hidratada pode trazer diversos benefícios a concretos asfálticos, como melhorias na suscetibilidade aos danos por umidade nos pavimentos, com efeitos positivos em misturas submetidas a múltiplos ciclos de Congelamento-Descongelamento (C-D) (MC CANN, 2003).

Resultados semelhantes foram apresentados na literatura nacional por Lutif *et al.* (2007), como mostrado na Figura 7, na qual se observa que a adição de cal hidratada contribuiu para o aumento na Resistência Retida à Tração (RRT), o que mostra que o dano por umidade pode ser minimizado. O efeito da cal fez-se ainda mais notório quando as misturas foram submetidas a múltiplos ciclos de Congelamento-Descongelamento (C-D).

As misturas sem tratamento de cal, isto é, B0 e B1, exibiram danos severos após múltiplos ciclos de C-D. A figura também mostra que a adição de cal seca é mais eficiente que a adição de lama de cal na redução do dano por umidade.

Outro ponto interessante descrito pelos autores é de que a mistura B1, tratada com filer mineral, inicialmente (com um ciclo C-D) teve comportamento similar ao das misturas tratadas com cal, o que indica que a adição de filer mineral pode ser positiva para reduzir o dano por umidade em seu estágio inicial.

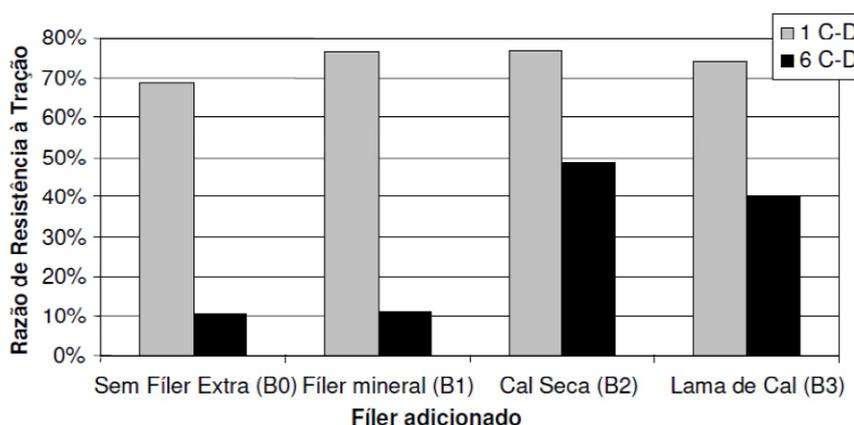


Figura 7: Razão de resistência à tração (RRT) das misturas (LUTIF *et al.*, 2007)

2.5.3.3 Resistência à tração

Existe na literatura um grande número de estudos em relação à resistência, pois a maioria dos resultados sobre a suscetibilidade à umidade utiliza ensaios de resistência, que é avaliada antes e depois de um processo de condicionamento. Portanto, os resultados sem condicionamento permitem uma avaliação do efeito do tratamento com cal sobre a resistência.

Na Figura 8 apresentam-se resultados do estudo realizado por Pickering *et al.* (1992), demonstrando a influência da incorporação de cal hidratada e dois líquidos *antistripping* na resistência à tração de misturas de concretos asfálticos.

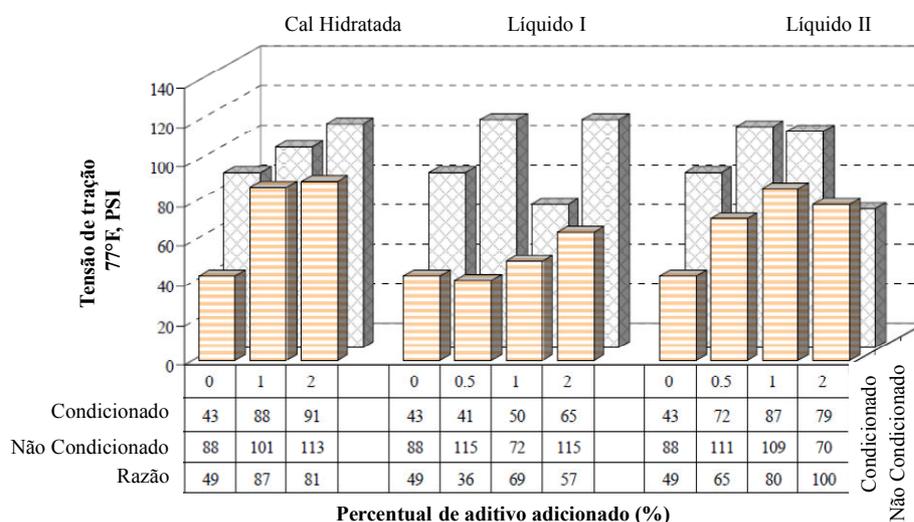


Figura 8: RT antes e após condicionamento das amostras (PICKERING *et al.*, 1992)

De maneira geral, as misturas com cal hidratada apresentam menor redução de resistência à tração (RT) após o processo de condicionamento quando comparadas com misturas sem aditivos ou com misturas tratadas com líquidos *antistripping*.

A variação do percentual de cal hidratada utilizada (de 1% para 2%) não teve influências significativas nos resultados de resistência nas amostras que sofreram condicionamento, enquanto que nas amostras que não sofreram condicionamento o aumento nesse percentual causou aumento de RT.

Resultados nacionais de Núñez *et al.* (2007) mostraram que as melhorias nas propriedades mecânicas dependem significativamente da qualidade da cal. Um teor de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ da ordem de 90% é necessário para otimizar a mistura asfáltica em termos de módulo de resiliência, resistência à tração e adesividade. No mesmo trabalho demonstrou-se que o teor de 1% mostrou-se suficiente para promover aumentos da ordem de 30% na resistência à tração.

Em análise realizada pela associação europeia de cal (EULA- *European Lime Association*) pôde-se concluir que dentre todas as publicações analisadas, a cal hidratada nem sempre aumenta a resistência das misturas asfálticas. De 113 misturas analisadas, apenas 63 tiveram um aumento na RT (56%). Não foram apresentados nesta análise os tipos de cal empregados na modificação das misturas.

2.5.3.4 Módulo de resiliência

As propriedades mecânicas de uma mistura asfáltica são conhecidas por serem dependentes da temperatura e tempo de carregamento, por consequência de seu comportamento viscoelástico. Assim, o módulo é dependente da temperatura e tempo (ou frequência). Embora o módulo seja uma propriedade intrínseca do material/mistura, o que significa que deve ser essencialmente independente do ensaio empregado, pequenas diferenças são geralmente observadas quando o módulo é medido em compressão, flexão ou tração indireta. Portanto, recomenda-se sempre enfatizar as condições de medição quando se fala em módulo de mistura asfáltica.

Devido ao enrijecimento que a cal hidratada promove no ligante asfáltico, como descrito nas seções anteriores, espera-se que ocorra um aumento no módulo em misturas tratadas com cal.

O módulo é de fundamental importância em um projeto de pavimento, pois governa a distribuição de tensões dentro de cada camada do mesmo. Para dada carga e espessura, um módulo maior significa tensões menores na camada.

Assim como na avaliação da RT, os resultados de Pickering *et al.* (1992), mostrados na Figura 9, evidenciam também um aumento do módulo de resiliência (MR) nas misturas com incorporação de cal hidratada. Para as misturas com cal, antes do condicionamento, observou-se um leve aumento de MR com o aumento do percentual adicionado (de 1% para 2%). Após o condicionamento, houve um menor decréscimo de MR para a mistura com 1% de cal. Para os líquidos *antistripping*, após o condicionamento observou-se queda significativa de MR.

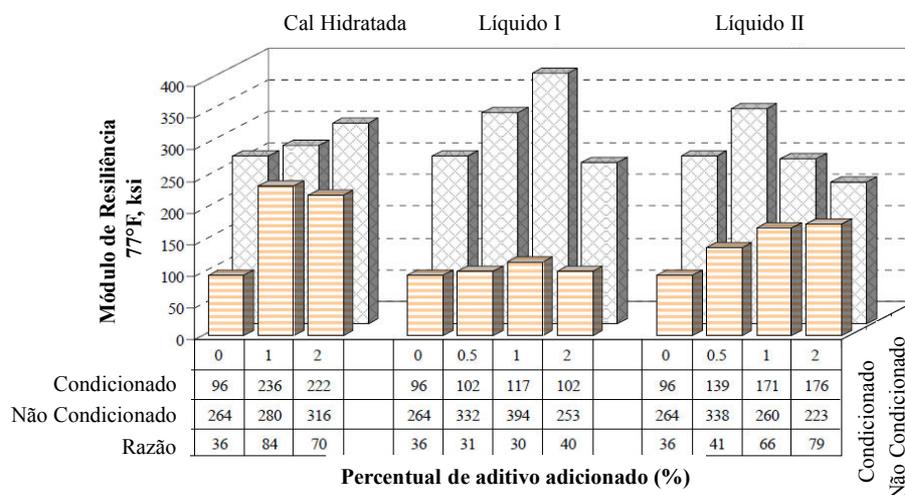


Figura 9: MR antes e após condicionamento das misturas (PICKERING *et al.*, 1992)

A influência do tipo e do teor de cal no módulo também foi avaliada por Núñez *et al.* (2007), constatando-se aumentos mais pronunciados com cales que apresentam teores de óxidos ou hidróxidos de cálcio mais elevados.

Nos resultados apresentados na Figura 10, as cales A e B apresentam estas características, sendo notável a diferença em relação aos resultados de mistura com a cal C, que são sensivelmente inferiores. Segundo os autores, o teor de 1% mostrou-se suficiente para promover aumentos da ordem de 70% no MR e de 30% na RT.

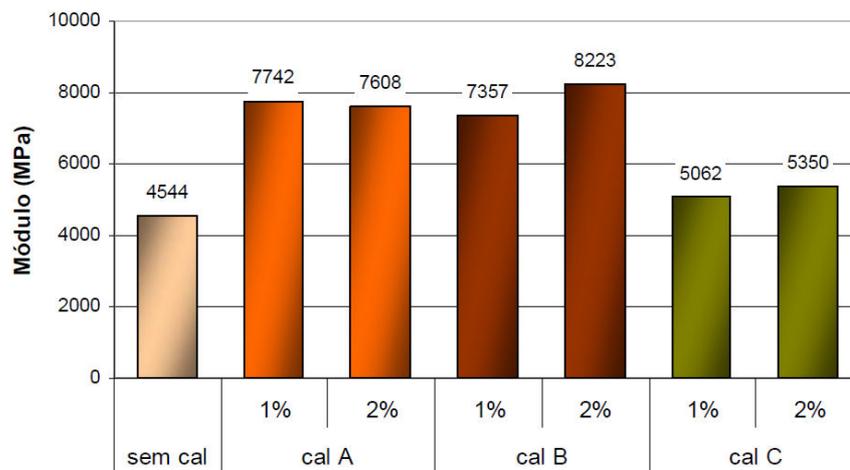


Figura 10: MR em função do tipo e teor de cal (NÚÑEZ *et al.*, 2007)

2.5.3.5 Resistência à deformação permanente

A deformação permanente é observada em misturas asfálticas desde o início de sua utilização, mas tornou-se cada vez mais importante após a 2ª Guerra Mundial, quando o tráfego comercial começou a aumentar rapidamente (SOUSA, 1991). Ela ocorre quando a carga exercida pelo tráfego sobre o revestimento asfáltico excede o seu limite plástico, portanto, gerando deformações plásticas permanentes (Figura 11). A deformação permanente é favorecida pela aplicação de cargas em baixa velocidade e altas temperaturas, quando o ligante asfáltico encontra-se em um estado de maior viscosidade.

Vários métodos de ensaio estão disponíveis para avaliar a resistência à deformação permanente de misturas asfálticas. A maioria são simuladores de tráfego, outros são ensaios mecânicos para quantificar a deformação permanente acumulada pelo material sob cargas repetidas em alta temperatura (geralmente na faixa de 40 a 60°C).

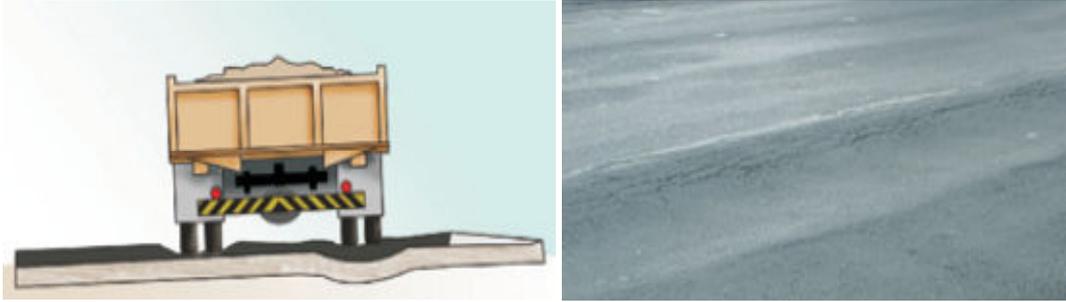


Figura 11: Deformação permanente em revestimento asfáltico (BERNUCCI *et al.*, 2006)

A capacidade da cal de tornar mais rígida uma mistura asfáltica, e ao mesmo tempo mais resistente a deformações permanentes, é um reflexo de seu desempenho como filler ativo.

Ao contrário do filler mineral inerte, a cal é quimicamente ativa, reagindo com o ligante tornando o pavimento mais resistente à deformação. Resultados de ensaios de Creep Dinâmico apresentados por Núñez (2009) evidenciam que a adição de cal aumentou a resistência à deformação permanente da mistura asfáltica, 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.

Um resultado típico da influência da adição de cal hidratada em misturas asfálticas é apresentado na Figura 12 (KIM *et al.*, 1995), onde percebe-se claramente a maior resistência à deformações permanentes de misturas tratadas com cal, superando também o resultado correspondente a uma mistura com líquido antistripping.

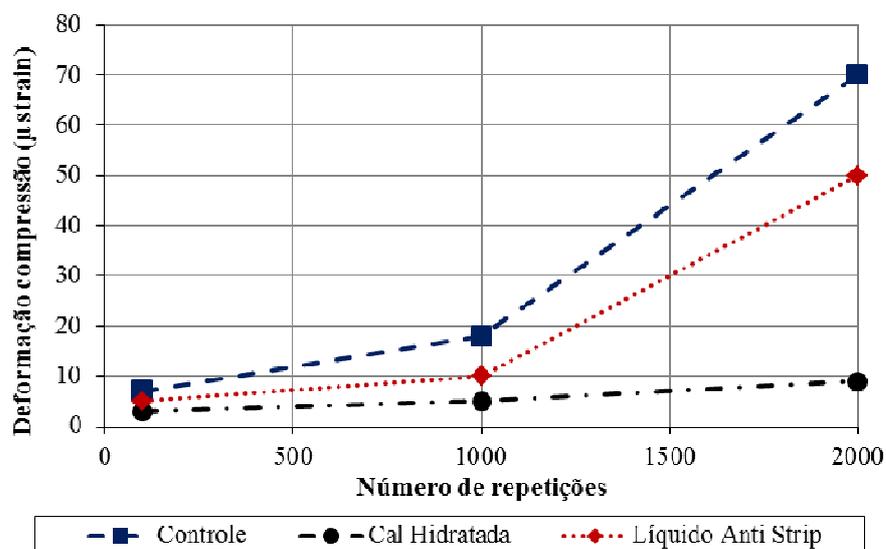


Figura 12: Efeito de aditivos na deformação permanente (Adaptado de KIM *et al.*, 1995)

Segundo resultados encontrados na literatura, a adição de cal hidratada melhora a durabilidade promovendo um enrijecimento maior do mástique em comparação com filer mineral normal, melhorando a resistência à deformação permanente em cerca de 75% das misturas analisadas (LITTLE *et al.*, 2001/2005; SEBAALY *et al.*, 2006/2007).

A influência da cal nas misturas asfálticas nas diversas propriedades analisadas e descritas anteriormente são apresentadas de forma resumida na

Tabela 2.

Tabela 2: 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) ₂ 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

3 MATERIAIS E PROCEDIMENTOS LABORATORIAIS

Este capítulo trata das características dos agregados, cales, ligantes asfálticos e das misturas asfálticas projetadas, bem como os procedimentos laboratoriais empregados na pesquisa.

3.1 PROGRAMA EXPERIMENTAL

O programa experimental desenvolvido para alcançar os objetivos desta pesquisa, está descrito resumidamente a seguir e consiste em:

- ✓ Escolha e caracterização do agregado pétreo (rocha basáltica) e dos ligantes asfálticos (convencional e modificado) para a formulação das misturas;
- ✓ Escolha de dois tipos de cal hidratada (calcítica e dolomítica), produzidas nos estados de Minas Gerais e Rio Grande do Sul respectivamente, escolha esta realizada em função de sua composição química;
- ✓ Definição da forma e da quantidade de incorporação de cal nas misturas, incorporação seca sobre o agregado graúdo seco, posterior mistura com agregado miúdo e ligante asfáltico no misturador (1% e 2% em relação aos agregados secos);
- ✓ Compactação com equipamento mecânico dos corpos-de-prova das misturas com incorporação de cal hidratada e sem incorporação (Referência) para posterior realização de ensaios;
- ✓ Definição de traços de CA sem cal e com incorporação de cal, através do método de dosagem Marshall e resultados de ensaios de módulo de resiliência, resistência à tração e dano por umidade induzida (Lottman Modificado);
- ✓ Realização de ensaios de resistência à tração por compressão diametral (RT), compressão diametral sob cargas repetidas para determinação de módulo de resiliência (MR) em distintas temperaturas, com e sem condicionamento das amostras, e de deformação permanente em laboratório (Creep Dinâmico).

- ✓ Determinação da resistência aos efeitos deletérios provocados pela presença de água (Resistência Retida à Tração - RRT) de corpos-de-prova de misturas asfálticas com e sem incorporação de cal (1% e 2% de incorporação), através da Metodologia Lottman Modificada.
- ✓ Ensaios para analisar os efeitos da incorporação de diferentes tipos de cal no envelhecimento por oxidação de misturas asfálticas e de ligantes asfálticos através dos ensaios de caracterização de ligantes (UCL® - *Universal de Caracterización de Ligantes*) e efeito do calor e do ar (RTFOT).

A seguir é apresentado um resumo de todos os ensaios realizados em misturas asfálticas (Tabela 3) e em ligantes asfálticos (Tabela 4).

Tabela 3: Ensaios realizados em misturas asfálticas

Mistura		1	2	3	4	5	6
		50/70 Ref.	60/85 Ref.	50/70 + CC ²	60/85 + CC	50/70 + CD ³	60/85 + CD
Projeto Marshall		15	15	15	15	15	15
Lottman Modificado RRT		6	6	6	6	6	6
MR, RT ¹	25°C Sem Cond.	6	6	6	6	6	6
	25°C Com Cond.	6	6	6	6	6	6
	35°C Sem Cond.	6	6	6	6	6	6
	35°C Com Cond.	6	6	6	6	6	6
Metodologia UCL		12	12	12	12	12	12
Def. Perm. (Creep Dinâmico)		3	3	3	3	3	3
Total por mistura		60	60	60	60	60	60
Total Geral		360					

¹ Sem Cond. - Amostras Sem Condicionamento; Com Cond. - Amostras Com Condicionamento

² CC - Cal Calcítica; ³ CD - Cal Dolomítica

Tabela 4: Ensaios realizados em ligantes asfálticos

Material		1	2	3	4	5	6
		CAP 50/70 Puro	CAP 60/85 Puro	CAP 50/70 + CC	CAP 60/85 + CC	CAP 50/70 + CD	CAP 60/85 + CD
Curto Prazo ¹	Ensaio de Caracterização Antes e Após Envelhecimento RTFOT	Densidade					
		Penetração					
		Ponto de Amolecimento					
		Viscosidade Rotacional					
Longo Prazo ²		Viscosidade Rotacional					

¹ Tempo de ensaio de 85 minutos; ² Tempo de ensaio de 120 minutos.

3.2 MATERIAIS UTILIZADOS NA PESQUISA

A avaliação das características dos materiais utilizados nesta pesquisa tais como ligantes asfálticos, agregados minerais e misturas asfálticas, foi realizada utilizando diversas técnicas laboratoriais. Os ensaios foram realizados no Laboratório de Pavimentação (LAPAV) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS).

3.2.1 Agregados minerais

Neste estudo foram utilizados agregados de origem basáltica da formação Serra Geral, proveniente do município de Santo Antônio da Patrulha – RS. Os agregados coletados na pedreira foram submetidos a ensaios laboratoriais para comprovar sua qualidade. Os resultados dos ensaios realizados estão apresentados na Tabela 5.

Tabela 5: Características dos agregados utilizados no estudo

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

Os resultados dos ensaios de análise granulométrica (média de duas determinações) estão apresentados na Tabela 6 e na Figura 13.

Tabela 6: Distribuição granulométrica dos agregados e das cales

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

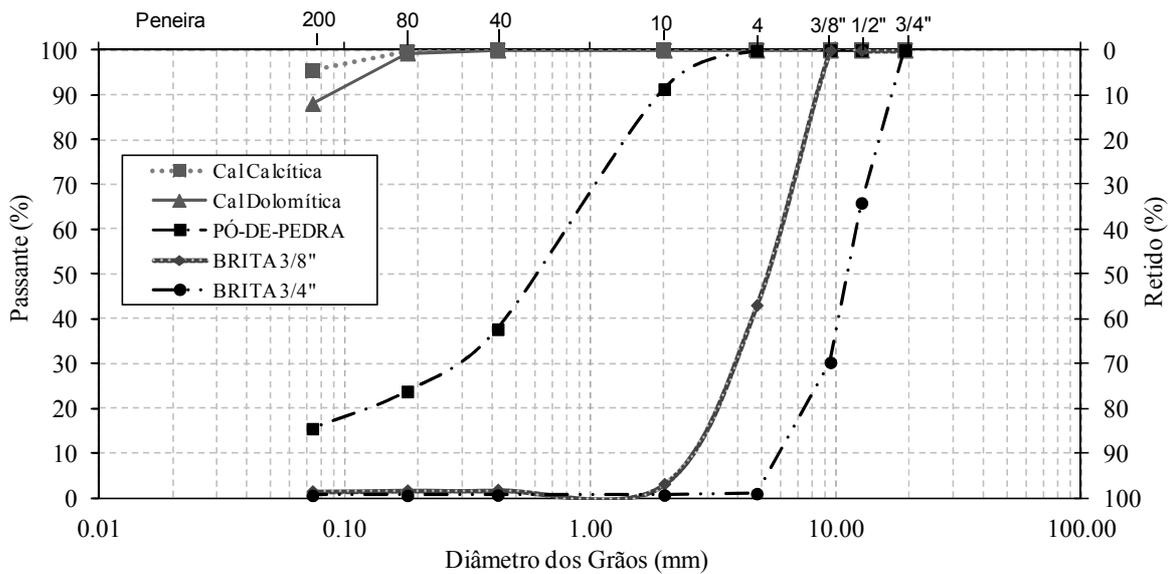


Figura 13: Distribuição granulométrica das cales e agregados utilizados no estudo

3.2.2 Filer

A utilização da cal nesse estudo tem múltipla função: como filer e como agente melhorador de adesividade agregado-ligante e de desempenho mecânico, visando a possibilidade de produção de misturas asfálticas com elevado desempenho e durabilidade.

Foram utilizados dois tipos de cal, uma cal dolomítica produzida no estado do Rio Grande do Sul, e uma cal calcítica produzida no estado de Minas Gerais. Os resultados dos ensaios de análise granulométrica (média de duas determinações) estão apresentados na Tabela 5 e na Figura 13.

- **Cal Calcítica**

Para a realização deste estudo foi utilizada uma cal calcítica produzida no estado de Minas Gerais. Esta escolha fundamentou-se no fato de que no Rio Grande do Sul são produzidas apenas cales com baixos teores de hidróxido de cálcio – $\text{Ca}(\text{OH})_2$. A bibliografia internacional, especialmente a estadunidense, indica sempre o emprego de cales com elevados teores de hidróxido de cálcio para a obtenção de melhores resultados quanto a melhorias de adesividade e desempenho das misturas asfálticas. Um teor de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ da ordem de 90% é necessário para otimizar as misturas asfálticas em termos de módulo de resiliência, resistência à tração e adesividade.

- **Cal Dolomítica**

A escolha pela cal dolomítica se deu pelo fato desta ser de uso corrente em obras de engenharia no Rio Grande do Sul, pois há somente a ocorrência deste tipo de cal no estado. Este tipo de cal tem sido adicionado como material de enchimento (filer) em diversas obras de pavimentação, sem avançar-se na discussão sobre a sua qualidade e os efeitos de sua incorporação no desempenho de misturas de concreto asfáltico (CA).

As Tabelas 7 e 8 apresentam algumas características físicas e químicas das cales utilizadas.

Tabela 7: Características físicas das cales utilizadas na pesquisa

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

Tabela 8: Características químicas das cales utilizadas na pesquisa

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

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

3.2.3 Ligantes asfálticos

Os tipos de ligantes utilizados neste estudo são: um ligante convencional (CAP 50/70) e outro modificado por polímero (CAP60/85-E). Na Tabela 9 apresenta-se a especificação de cimentos asfálticos modificados por polímeros elastoméricos, na qual se enquadra o ligante utilizado na presente pesquisa.

Estes tipos de ligantes asfálticos são convencionalmente empregados em obras de pavimentação no Rio Grande do Sul, os resultados dos ensaios de caracterização estão apresentados na Tabela 10 e 11.

Tabela 9: Especificação para cimentos asfálticos de petróleo modificados por polímero elastomérico ANP n° 04/2010.

GRAU (Ponto de Amolecimento, mín./Recuperação Elástica, mín.)		55/75-E	60/85-E	65/90-E
Ensaio na amostra virgem:	Métodos	Limite de Especificação		
Penetração 25°C, 5 s, 100 g, dmm	NBR 6576	45-70	40-70	40-70
Ponto de Amolecimento mín., °C	NBR 6560	55	60	65
Viscosidade Brookfield a 135°C, spindle 21, 20 RPM, máx., cP	NBR 15184	3000	3000	3000
Viscosidade Brookfield a 155°C, spindle 21, 50 RPM, máx., cP	NBR 15184	2000	2000	2000
Viscosidade Brookfield a 175°C, spindle 21, 100 RPM, máx., cP	NBR 15184	1000	1000	1000
Ensaio de separação de fase, máx., °C	NBR 15166	5	5	5
Recuperação elástica a 25°C, 20 cm, mín., %	NBR-15086	75	85	90
Ensaio no resíduo do RTFOT				
Varição de massa, máx., %	ASTM D 2872	1	1	1
Varição do PA, °C, máx.	NBR 6560	-5 a +7	-5 a +7	-5 a +7
Porcentagem de Penetração original, mín.	NBR 6576	60	60	60
Porcentagem de Recuperação Elástica Original a 25°C, mín	NBR 15086	80	80	80

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

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

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

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

3.2.4 Misturas asfálticas

A dosagem das misturas asfálticas e a moldagem das amostras, juntamente com a obtenção dos parâmetros de dosagem Marshall (DNER – ME 043/95 e DAER/RS – ES – 16/98) foram realizadas no LAPAV. O concreto asfáltico foi projetado seguindo as recomendações do *Asphalt Institute* (1995a) e de acordo com ASTM D6926-04 e ASTM D 6927-05; o volume de vazios (VV) adotado foi de 4% como critério de dosagem.

A composição granulométrica da mistura foi feita de forma a enquadrar o material próximo ao centro da faixa “C” do DNIT (Figura 14), com tamanho máximo de granulares de 19 mm.

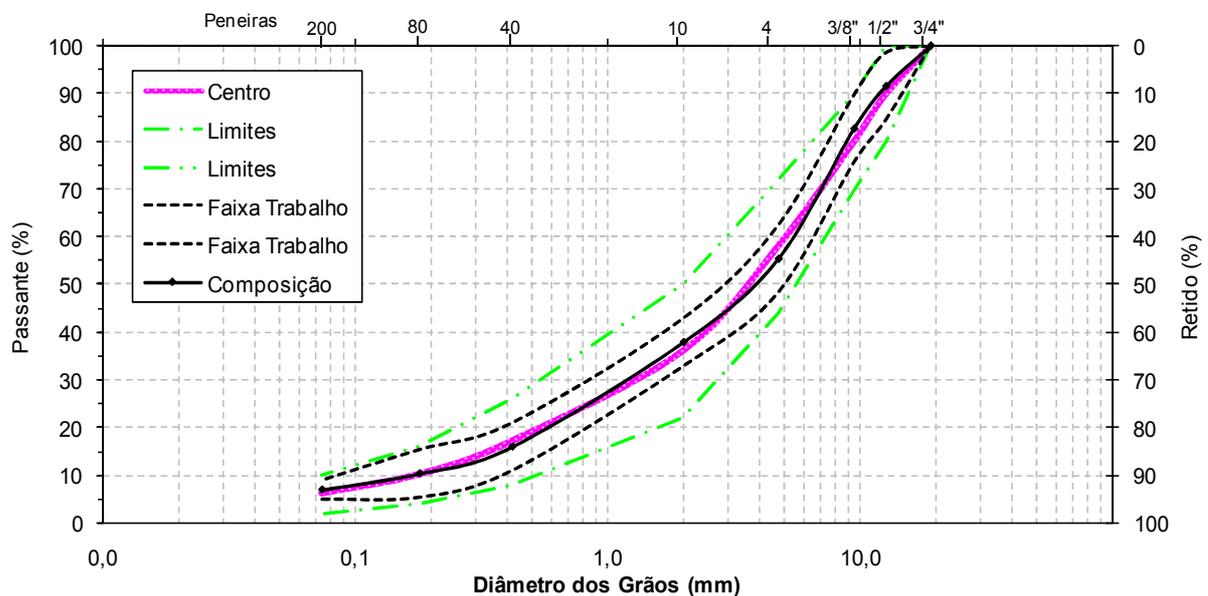


Figura 14: Composição granulométrica adotada no estudo - Faixa C DNIT

3.3 PROCEDIMENTOS LABORATORIAIS

Para caracterizar o comportamento dos concretos asfálticos estudados foram realizados, após a dosagem das misturas, ensaios para determinação da resistência à tração, módulo de resiliência, ensaios de deformação permanente (*Creep Dinâmico*), além de ensaios de caracterização da resistência aos efeitos deletérios causados pela umidade através da metodologia Lottman Modificada.

3.3.1 Dosagem Marshall

Apesar de ser contestada por muitos autores, em virtude da dispersão de seus resultados (principalmente nos valores de estabilidade e fluência), e do confinamento do corpo-de-prova na determinação da estabilidade (que não representa modos de ruptura da mistura no campo), e da forma de compactação (que não é a mesma do campo), a dosagem Marshall é ainda um dos procedimentos mais utilizados para dosagem e controle de qualidade das misturas asfálticas no Brasil, principalmente devido à simplicidade e ao baixo custo dos equipamentos.

Inicialmente foram coletados e armazenados os agregados e os ligantes utilizados na preparação das misturas. Os agregados foram armazenados em sacos impermeáveis em local isento de umidade, devidamente identificados. Os ligantes foram acondicionados e armazenados em latas de 3,6 litros para evitar seu reaquecimento.

Para a moldagem das amostras de concreto asfáltico foram seguidos os seguintes passos:

- i) **separação dos agregados:** cada uma das frações de agregado utilizada foi seca em estufa à 60°C e separada em frações granulométricas, empregando as peneiras da especificação do DNIT; em seguida cada fração foi lavada na respectiva peneira e então seca em estufa e acondicionada em sacos plásticos.
- ii) **pesagem e mistura:** a partir do ajuste granulométrico, feito com auxílio de uma planilha eletrônica, o material pétreo foi pesado em bandejas metálicas, e levado à estufa para aquecimento; as temperaturas de mistura e compactação foram determinadas através da relação temperatura *versus* viscosidade.

A incorporação de cal às misturas asfálticas foi anterior à adição do ligante asfáltico, sendo adicionada ao agregado gráudo seco (1% e 2% do peso total da mistura mineral), em seguida a cal foi revolvida de maneira a recobrir todo o agregado, após esta etapa o material fino foi adicionado, para em seguida aquecer-se toda a mistura até a temperatura de usinagem e então acrescentar o ligante em um misturador mecânico para posterior compactação.

A mistura dos agregados e do ligante asfáltico foi feita em um misturador eletromecânico composto de um motor elétrico trifásico, controle eletrônico de rotação, cuba térmica dotada de duas resistências elétricas (2000 W cada) imersas em óleo térmico e com capacidade para 10 L; o controle de temperatura da cuba é feito através de um controlador digital.

- iii) **compactação:** a compactação das amostras foi realizada em compactador mecânico tipo Marshall com frequência de 60 Hz e contador eletrônico do número de golpes. A massa era colocada em três camadas dentro de um molde pré-aquecido com acomodação por golpes de um bastão de cobre. A energia de compactação utilizada foi de 75 golpes por face.
- iv) **desmoldagem:** após a compactação as amostras foram deixadas em repouso durante 24 h e então extraídas dos moldes, que sofriam um leve aquecimento para facilitar o processo; as amostras eram então identificadas, medidas, pesadas e encaminhadas aos ensaios específicos.

A Figura 15 apresenta um resumo destas etapas:



Figura 15: Preparação dos agregados e moldagem das amostras

3.3.2 Resistência à tração por compressão diametral (RT)

O ensaio de compressão diametral foi desenvolvido pelo professor Fernando Luiz Lobo Carneiro para determinação da resistência à tração de corpos-de-prova cilíndricos de concreto de cimento Portland, através de solicitação estática (MEDINA e MOTTA, 2005).

O ensaio para a determinação da resistência à tração por compressão diametral nas amostras com diâmetro 10,2cm e altura variável (~ 6,35cm) (Figura 16 a), segue as prescrições da norma ABNT NBR 15087 e consiste na aplicação de uma carga estática de compressão distribuída ao longo de duas geratrizes opostas, a fim de se obter as tensões de tração através do diâmetro horizontal, perpendicularmente à carga conforme Figura 16 b.

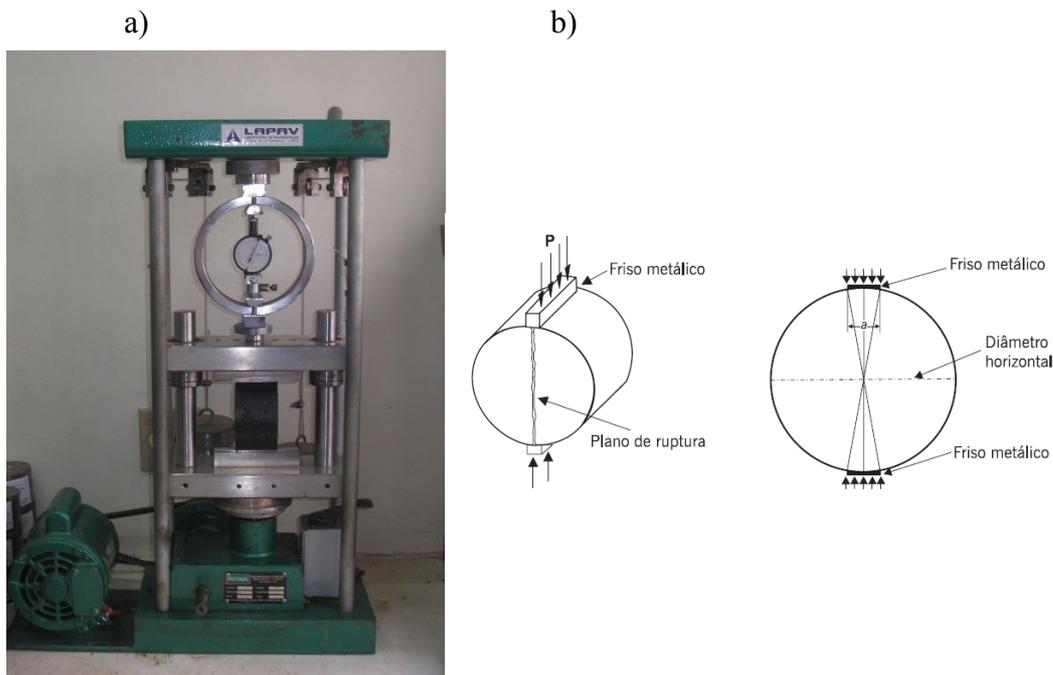


Figura 16: a) Equipamento utilizado no ensaio de resistência à tração;
b) estado de tensões gerado durante o ensaio (Fonte: Specht: 2004)

A velocidade de avanço do carregamento é de 0,8mm/s e a equação utilizada para o cálculo de RT é a seguinte (Equação 1):

$$\sigma = \frac{2 \times F}{100 \times \pi \times D \times H} \quad \text{Equação (1)}$$

Onde:

σ = Tensão de tração uniforme, em MPa;

F = Força aplicada por unidade de espessura da amostra, em N;

D = Diâmetro da amostra, em cm;

H = Altura da amostra, em cm.

Tanto os ensaios de resistência à tração quanto os ensaios de módulo de resiliência foram realizados em duas temperaturas distintas 25°C e 35°C em amostras com e sem condicionamento. Realizou-se um processo de condicionamento para provocar de forma acelerada situações que testem a adesividade ligante/agregado e o envelhecimento das amostras. Um resumo dos métodos e procedimentos que avaliam a suscetibilidade das misturas asfálticas à ação deletéria da água e ao envelhecimento é apresentado por MOURA (2001), de onde foi derivado o procedimento adotado nesta pesquisa, descrito abaixo:

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

Observações posteriores levaram à conclusão que se trata de condicionamento de baixa severidade, pois para acelerar o processo de dano pela água e do envelhecimento das amostras em estufa, as mesmas deveriam ter sido moldadas com volume de vazios entre 6 e 8%. Ressalta-se que este tipo procedimento foi realizado por se dispor de uma quantidade significativa de amostras que não puderam ser utilizadas em outros ensaios devido a problemas técnicos no equipamento de ensaio de fadiga, para o qual estavam anteriormente designados.

3.3.3 Módulo de resiliência (MR)

O módulo de resiliência é um fator importante na definição do dimensionamento racional dos pavimentos, estando intimamente ligado ao projeto de mistura. É definido como a razão entre a tensão de tração e a correspondente deformação específica recuperável, quando as misturas de CA são submetidas a carregamentos cíclicos, de curta duração.

O módulo de resiliência das amostras de concreto asfáltico foi determinado adotando-se o método de ensaio DNER- ME 133/94: Misturas betuminosas - determinação do módulo de resiliência. O equipamento utilizado, conforme Figura 17 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. Utilizaram-se corpos-de-prova de 10,2cm de diâmetro e altura variável (~6,35cm).

A partir da aplicação do carregamento, com tempo de 0,1 s e 0,9 s de repouso, a amostra sofre deformações horizontais, que são medidas através de um LVDT, ligado a um microcomputador. O coeficiente de Poisson foi fixado em 0,30. Utilizou-se para este ensaio a mesma metodologia de condicionamento realizado no ensaio de resistência à tração.

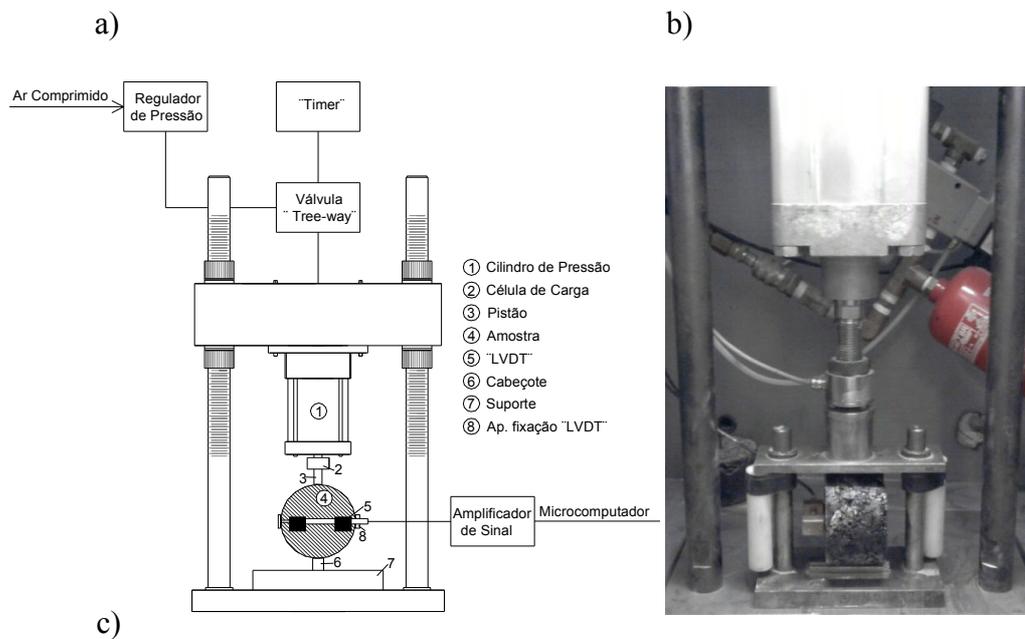


Figura 17: a) Corte esquemático e; b) equipamento para de ensaio de módulo de resiliência; c) Registro gráfico típico do ensaio de módulo de resiliência (Fonte: Specht: 2004)

O módulo de resiliência é calculado através da Equação 2 (BRITO, 2006):

$$MR = \frac{P}{\delta_h \times H} \times (0,7801\mu + 0,2339) \quad \text{Equação (2)}$$

Onde:

MR = Módulo de Resiliência, em MPa;

P = Carga vertical cíclica aplicada diretamente na amostra, em N;

δ_h = Deslocamento horizontal medido, em cm;

H = Altura da amostra, em cm;

M = Coeficiente de Poisson.

3.3.4 Deformação permanente (*Creep Dinâmico*)

Conforme já descrito na Revisão Bibliográfica, uma das vantagens do emprego de cal hidratada em misturas asfálticas é torná-las mais resistentes às deformações permanentes. Esse “enrijecimento” da mistura pode ser avaliado através do ensaio de módulo de resiliência (maiores módulos indicam misturas mais rígidas, que experimentam menores deformações elásticas e acumulam também menores deformações permanentes).

Contudo, o ensaio de deformação permanente sob cargas repetidas (*Creep Dinâmico*) parece mais adequado para avaliar o quanto uma mistura é resistente ou susceptível a deformações permanentes, que no campo se manifestam na forma de afundamentos nas trilhas de roda (ATR) e, às vezes, irregularidade longitudinal.

O ensaio não é normalizado no Brasil. Atualmente, no LAPAV/UFRGS, utiliza-se o seguinte procedimento (esquema demonstrativo Figura 18):

- Condicionamento a 45°C por um período mínimo de 3 horas antes do ensaio;
- O sistema de medição de deslocamentos é constituído por duas alças, cada uma com quatro pontos de apoio na amostra, nas quais se instalam os dois LVDTs;
- Posicionado o sistema sob o pistão de aplicação de cargas, inicia-se o ensaio.

O ensaio é realizado aplicando-se carregamentos que geram pressões iguais a 0,56 MPa (pressão de inflação dos pneus de um eixo padrão), com frequência de 1 Hz.

Inicialmente, realiza-se um condicionamento, onde são aplicados 200 ciclos de cargas, para acomodação do sistema e amostra. Em seguida, há um período de “descanso de condicionamento” de 400 segundos para recuperação das deformações iniciais.

O ensaio se dá, propriamente, a partir do ciclo número 600, após essas duas etapas iniciais. O período de carregamento para medição efetiva das deformações permanentes é de 3600 ciclos, seguido de 900 ciclos de recuperação das deformações.

Após o ensaio, os dados são interpretados em planilha eletrônica e são obtidos os resultados conforme demonstrado na Figura 19. São obtidos valores de deslocamentos em centímetros, transformados em deformações através da divisão deste valor pela distância inicial entre os suportes dos LVDTs (4 cm).

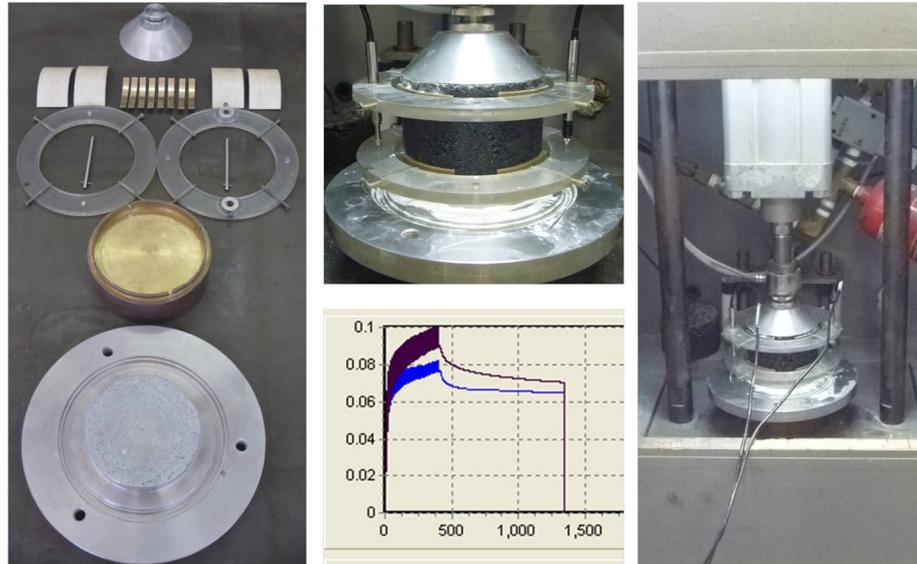


Figura 18: Esquema de ensaio Creep Dinâmico

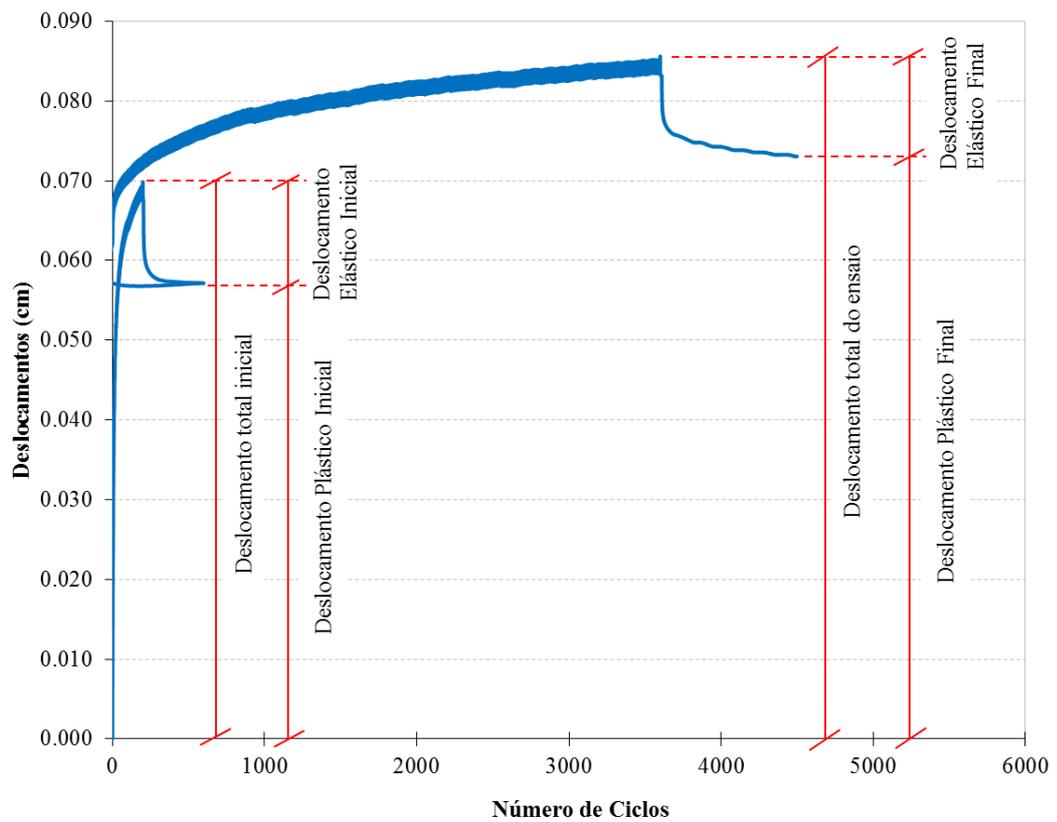


Figura 19: Representação gráfica dos deslocamentos durante o ensaio de *Creep Dinâmico*

3.3.5 Efeito deletério da água (Lottman Modificado)

O teste de sensibilidade à ação deletéria da água mais usado no Brasil segue o procedimento descrito na NBR 15617. Os resultados permitem a estimativa do deslocamento da película de ligante do agregado nos concretos asfálticos e a avaliação de melhoradores de adesividade como a cal hidratada, que são adicionadas ao agregado.

São produzidos dois subgrupos com três corpos-de-prova cada, que são compactados para atingirem um teor de vazios entre 6 e 8 %. Um subgrupo é condicionado pela saturação a vácuo (entre 55% e 80%). Em seguida, aplicam-se ciclos de congelamento (-18°C durante um período de 16 horas) e imersão em banhos de água (60°C por um período de 24 horas).

A análise é feita pela relação entre a resistência à tração de amostras com condicionamento prévio e amostras sem condicionamento. 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%.

3.3.6 Metodologia UCL® (*Universal de Caracterización de Ligantes*)

Esta metodologia denominada “*Universal de Caracterización de Ligantes*” (UCL®), foi desenvolvido na Universidade Politécnica da Catalunha, Espanha pelos professores Miró e Pérez-Jiménez no ano de 1989 (PÉREZ-JIMÉNEZ e MIRÓ RECASENS, 1993).

O Método UCL® foi concebido para avaliar a coesão que uma determinada quantidade de ligante proporciona à agregados de composição granulométrica fixa (mistura padrão) composta fundamentalmente de partículas grossas e uma pequena quantidade intermediária sem finos que tem como função “fechar” um pouco a mistura e proporcionar uma maior resistência ao desgaste. Por ser uma fração intermediária sem finos não se forma nenhum tipo de masticue e os agregados são envolvidos unicamente pelo ligante.

A granulometria da mistura padrão foi definida depois de muitos ensaios realizados sobre distintas composições granulométricas e foi fixada como sendo composta por 80% de agregados compreendidos entre os tamanhos de 5,0mm e 2,5mm (#4 e #8) e 20% entre os tamanhos 2,5mm e 0,63mm (#8 e #30) por ter sido a granulometria que proporcionou grande repetibilidade e reprodutibilidade do ensaio.

O conteúdo de ligante sobre os agregados é uma quantidade fixa de 4,5% em relação ao peso seco dos agregados (900g para cada amostra). Com esta composição de mistura obtém-se um índice de vazios de aproximadamente $27 \pm 1\%$ através da compactação de corpos-de-prova Marshall com aplicação de 50 golpes por face.

Este método tem o objetivo de utilizar o ensaio Cantabro para caracterizar as propriedades fundamentais dos ligantes asfálticos mediante um único ensaio, rápido e simples, podendo-se caracterizar o comportamento nas mesmas condições em que se encontra na realidade, tanto para ligantes convencionais quanto ligantes modificados.

O projeto destas misturas é baseado em um compromisso claro entre sua permeabilidade e sua resistência a desagregação. Uma diminuição dos finos e da porcentagem de ligante provoca um aumento da permeabilidade, mas também uma diminuição de sua coesão e resistência à desagregação. A coesão é um fator de grande interesse no estudo das misturas porosas, pois dela vão depender em grande parte sua resistência aos esforços de abrasão e sucção causada pelo tráfego.

Pela possibilidade do ensaio Cantabro medir uma propriedade de grande importância do ligante como a coesão que este proporciona à mistura, a proposta do método UCL® consiste na utilização deste ensaio na avaliação de propriedades fundamentais dos ligantes como a coesão, suscetibilidade térmica, adesividade ligante-agregado, envelhecimento e características do mastique filler-betume. Desta forma os autores propuseram a utilização do procedimento para caracterizar o comportamento do ligante como parte integrante da mistura, não de forma separada como normalmente ocorre.

Um dos principais resultados que se obtém através da aplicação da Metodologia UCL® é a curva de estado, que nada mais é do que a porcentagem de perda por abrasão da amostra pela temperatura de condicionamento. O procedimento normalmente seguido no ensaio consiste em manter as amostras condicionadas em freezer ou estufa por um período mínimo de 2 horas na temperatura de ensaio e posteriormente introduzi-las rapidamente na máquina de abrasão Los Angeles (Figura 20), em um ambiente com temperatura próxima a 25°C.

A variação de temperatura durante o ensaio pode afetar de maneira significativa os resultados, por isso este fator foi observado de maneira bem criteriosa na realização dos ensaios da pesquisa relatada nesta Dissertação.



Figura 20: Máquina de abrasão Los Angeles e amostras após ensaio

Segundo os autores da metodologia, a mesma pode ser também aplicada para avaliar o efeito de diferentes tipos de fileres, em caso de mástique asfáltico. O filer é o elemento das misturas asfálticas que se mistura mais intimamente com o ligante, modificando a sua reologia e comportamento devido a seu tamanho, com partículas menores que 0,063mm que se combinam com o ligante.

O efeito do filer é modificar a viscosidade, aumentando a sua resistência a ruptura e diminuindo sua ductilidade, efeito que depende da finura do filer, de sua natureza e da relação volumétrica filer/betume.

Normalmente, a caracterização do filer se faz independentemente do ligante, sem levar em conta as possíveis interações nas propriedades de um e outro podem ter no comportamento conjunto. O método UCL® permite avaliar este comportamento conjunto. Já que se define o efeito de uma determinada quantidade de ligante sobre uma mistura padrão, pode-se definir também o efeito de uma quantidade fixa de mástique sobre a mesma mistura padrão. Pode-se definir assim, a influência do filer na mistura e determinar como afeta a suscetibilidade e o poder aglomerante do ligante.

Para a determinação da quantidade de filer (cal hidratada) a ser adicionada na mistura padrão foi determinada a concentração crítica do filer no ligante. A concentração crítica de um filer é atingido quando o mástique começa a enrijecer. O sistema torna-se mais frágil e algumas características desejadas, tais como a coesão, flexibilidade e durabilidade, começam a apresentar diminuição.

A concentração crítica corresponde a uma dispersão de partículas de filler no ligante que permite que as mesmas possam se movimentar livremente quanto possível, mas em contato umas com as outras. Em outras palavras, a concentração crítica é atingida quando a tensão aplicada é consumida na deformação viscosa do meio contínuo e a resistência de atrito entre as partículas é mínima.

A metodologia para determinação deste parâmetro foi proposta por Ruiz (1947), que propôs a realização de ensaio de sedimentação simples para encontrar o valor crítico que garante comportamento viscoso do mástico. Este procedimento é normatizado pela norma Argentina IRAM 1542. Neste procedimento se determina mediante um ensaio de sedimentação, o volume máximo de filler que pode se empregar para que todas as partículas sejam envolvidas por uma película de ligante, de forma que esta sempre esteja em seu interior.

Através desta concentração máxima, é determinada a concentração crítica (C_s). Analisa-se dessa forma o efeito da concentração volumétrica (C_v) e a natureza do filler sobre o poder aglomerante do ligante. Ambos os parâmetros são determinados através das seguintes equações:

$$C_s = \frac{P}{V \cdot G_f} \quad \text{Equação (3)}$$

Onde:

C_s = Concentração crítica;

P = Peso do filler (seco), em gramas;

V = volume de filler estabelecido após 24 horas de sedimentação em querosene, em cm^3 ;

G_f = peso específico do filler, em g/cm^3 .

Quando o filler é adicionado à mistura, a viscosidade do mástico betuminoso aumenta gradualmente com o aumento da concentração volumétrica:

$$C_v = \frac{\text{Vol}_{\text{Filler}}}{\text{Vol}_{\text{Filler}} + \text{Vol}_{\text{Ligante}}} \quad (2)$$

Na aplicação da Metodologia UCL neste estudo utilizou-se valores de $C_v/C_s = 1$.

3.3.7 Efeito do calor e do ar (RTFOT)

Conhecido como *Rolling Thin Film Oven Test* – estufa de filme fino rotativo (RTFOT) ou película delgada rotacional, este ensaio dá uma ideia do envelhecimento (endurecimento) do cimento asfáltico, por perda de constituintes voláteis, fundamentalmente devido à estocagem, usinagem e período de transporte.

Nesse ensaio, uma fina película de asfalto de $35\pm 5\text{g}$ é continuamente girada dentro de um recipiente de vidro a 163°C por 85 minutos, com uma injeção de ar a cada 3 a 4 segundos.

Este método visa submeter uma amostra de asfalto a condições de enrijecimento aproximadas das que ocorrem nas operações de instalações das misturas a quente. A perda ou ganho de massa no aquecimento e os ensaios de viscosidade e de penetração, feitos na amostra, antes e depois do RTFOT, são tidos como uma medida da resistência do material a mudanças em condições que causam o enrijecimento.

O RTFOT, que está padronizado pela ASTM desde 1970 (ASTM D 2872-04), e pela Shell desde 1973, recentemente foi incluído como parte da especificação da Comunidade Europeia (EN 12591/2000) e, em 2005, foi aprovada no Brasil a especificação ABNT NBR 15235/2005, substituindo o ensaio ECA na caracterização de ligantes asfálticos (BERNUCCI *et al.*, 2006). A Figura 21 mostra uma estufa RTFOT empregada no ensaio de envelhecimento acelerado.



Figura 21: Estufa RTFOT para realização do ensaio de envelhecimento acelerado

Este ensaio pode resultar em uma perda ou ganho de massa. Durante o ensaio, componentes voláteis evaporam, causando uma diminuição da massa, enquanto o oxigênio reage com a amostra, causando um aumento de massa. Amostras com um percentual muito pequeno de componentes voláteis geralmente terão um ganho de massa, enquanto amostras com um alto percentual de componentes voláteis normalmente terão uma perda de massa.

Após a realização do ensaio, o material resultante é retirado dos frascos e submetido aos ensaios fundamentais de caracterização, condicionados às exigências de aceitação.

Para realização dos ensaios de avaliação da influência que a incorporação de cal hidratada exerce nas propriedades fundamentais dos ligantes asfálticos, principalmente no que se refere ao envelhecimento, a definição da quantidade de cal a ser incorporada foi realizada em função dos teores de cal e ligante utilizados nas misturas asfálticas.

Sendo a quantidade de cal nas misturas asfálticas correspondente a 1% do peso total de agregados e a quantidade de ligante asfáltico igual a 4,2% em misturas com ligante convencional e 4,5% com ligante modificado, chega-se a uma relação de cal/betume de 0,23 e 0,22, respectivamente, ou seja, uma proporção de 23,8% de cal incorporada no ligante asfáltico convencional e 22,2% de cal incorporada no ligante modificado.

A incorporação da cal foi realizada de forma manual, onde a cal foi despejada de forma gradativa em um recipiente contendo ligante asfáltico aquecido (temperatura de 150°C, conforme preconiza o método de ensaio do efeito de calor e ar em estufa RTFOT) na quantidade ideal para realização dos ensaios. A mistura foi homogeneizada, durante 5 minutos, sobre um fogão aquecido, para manter a temperatura do ligante constante durante o processo de incorporação.

4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

A seguir são apresentados e discutidos os resultados obtidos na parte experimental da pesquisa, tais como: definições das abordagens adotadas para verificação da influência da incorporação de diferentes tipos de cal nos concretos asfálticos, definição de teor de cal a ser incorporado nas misturas, resultados de caracterização mecânica e de determinação da coesão/adesão das misturas e de envelhecimento dos ligantes, em sua forma pura e com incorporação de cal hidratada.

4.1 ESTUDO DE DOSAGEM E DEFINIÇÃO DE ABORDAGEM

Para a definição de uma forma coerente de avaliação da influência que a cal promove nas propriedades das misturas a serem projetadas enfrentou-se inicialmente certa dificuldade na fixação de um procedimento no qual pudesse ser minimizada qualquer alteração na mistura que poderia influenciar ou mascarar a ação da cal hidratada.

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

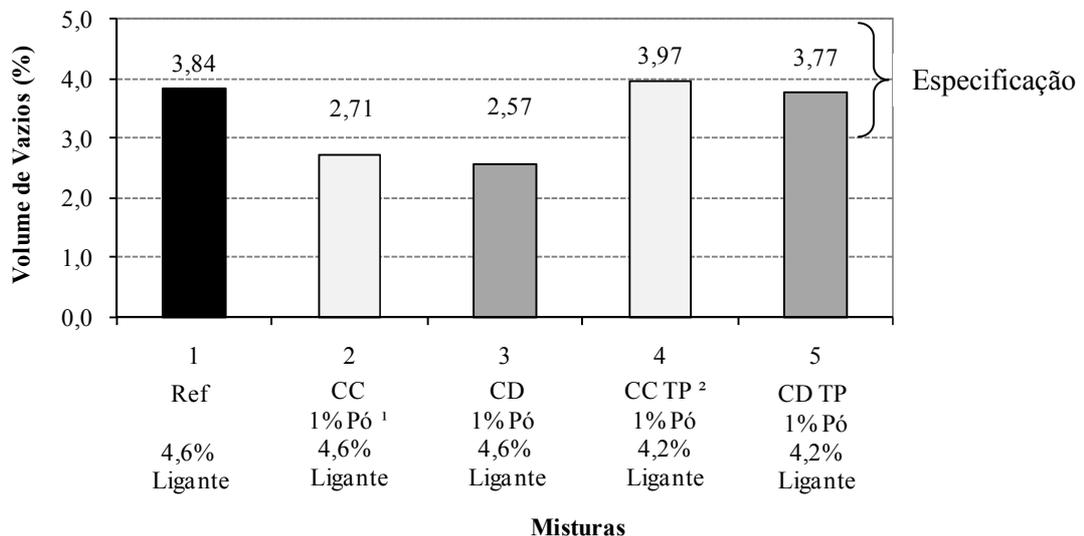
4.1.1 Parâmetros de dosagem Marshall

Os resultados apresentados a seguir correspondem a concretos asfálticos (CA) produzidos com agregados de rocha basáltica, cimento asfáltico de petróleo convencional (CAP 50/70) e modificado por polímero elastomérico (CAP 60/85-E) e cal hidratada calcítica e dolomítica.

Para a realização de uma análise comparativa entre a mistura de Referência (sem cal) e as misturas com cal hidratada, enfrentou-se inicialmente certa dificuldade na fixação de parâmetros (teor de ligante da mistura, volume de vazios, curva granulométrica), pois os mesmos estão diretamente interligados, e passam a ser modificados quando se faz a incorporação de um novo elemento na mistura, a cal.

Após a definição da forma de incorporação (seca sobre agregado graúdo), procedeu-se a uma simples substituição de 1% do pó-de-pedra da composição granulométrica da mistura em questão pela mesma quantidade de cal (mantendo teor de ligante de projeto constante).

A partir da determinação dos parâmetros volumétricos da composição formulada fez-se um comparativo entre a mesma e a mistura de Referência. Constatou-se que a simples substituição de 1% do pó-de-pedra da composição granulométrica pela mesma quantidade de cal hidratada (o que seria facilmente aplicável em campo) causou redução significativa do volume de vazios (VV) conforme mostrado na Figura 22. Mais ainda, o VV fica fora da faixa de valores da especificação DNER-ME 043/95 para misturas convencionais (3% a 5%), o que demonstra a inconveniência da simples substituição.



¹ 1% Pó: Substituição 1% Pó-de-Pedra por Cal

² TP: Novo Teor de Projeto

Figura 22: Variação do volume de vazios (Vv) das misturas com incorporação de cal calcítica (CC) e cal dolomítica (CD) em relação à mistura de Referência

Este fato pode ser explicado pela diferença de massa específica, massa específica aparente solta e granulometria dos materiais (pó-de-pedra com massa específica de $2,83\text{g/cm}^3$ e massa específica aparente solta de $1,72\text{g/cm}^3$ e cal hidratada com massa específica média de $2,27\text{g/cm}^3$ e massa específica aparente solta de $0,52\text{g/cm}^3$).

Como a substituição destes materiais foi realizada em massa, acrescentou-se um volume de material maior do que o volume retirado. Adicionalmente, substituiu-se material mais graúdo por material mais fino, o que causou o “fechamento” da mistura. A soma destes fatores causou diminuição do volume de vazios da mistura, mantendo-se o teor de ligante inalterado.

Cogitaram-se ainda outros procedimentos visando manter constante o teor de ligante da mistura, pois se tencionava fazer a análise da influência da cal hidratada nos concretos asfálticos sem mudar esse parâmetro, por entender-se que qualquer alteração no teor de ligante poderia disfarçar e dificultar a quantificação dos efeitos da incorporação de cal.

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

Após insucessos decorrentes da adoção dessas alternativas, considerou-se mais adequada a manutenção da composição granulométrica (persistindo substituição de 1% do pó-de-pedra pela mesma quantidade de cal) e do volume de vazios da mistura (julgado o mais importante), adotando-se como solução a realização de novas dosagens. Procedeu-se, então, a nova dosagem das misturas considerando a incorporação da cal hidratada, ou seja, definiu-se uma nova dosagem, cujas etapas são mostradas na Figura 23, como solução para manter o volume de vazios na faixa de aceitabilidade.

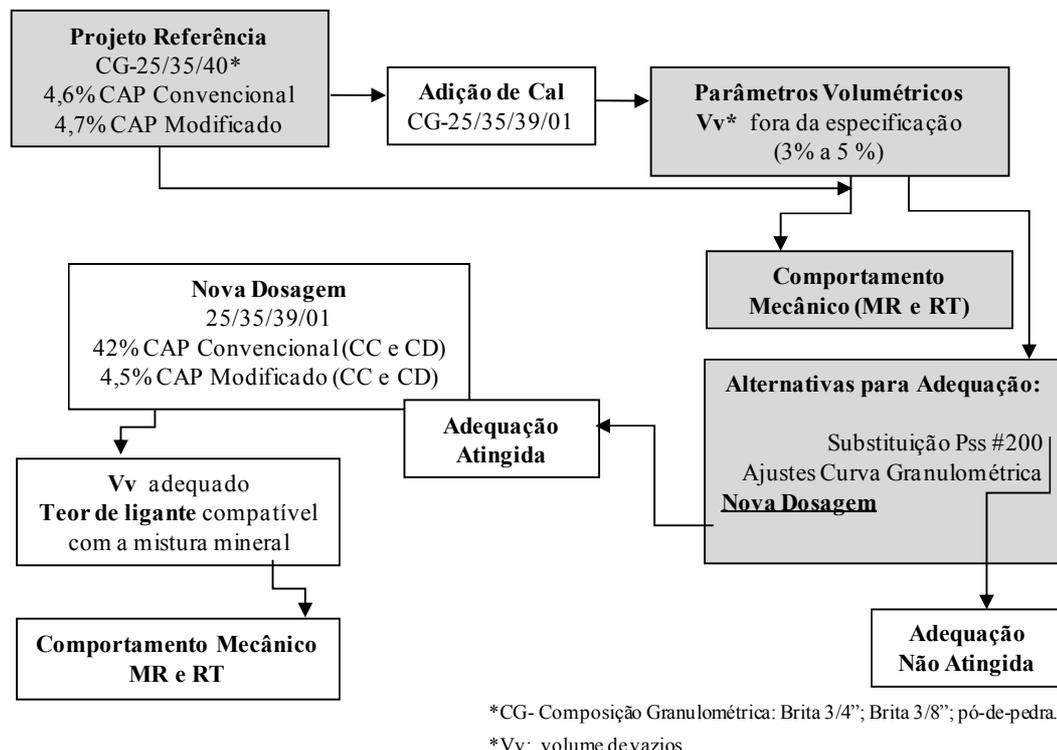


Figura 23: Etapas seguidas para análise da influência de adição de cal hidratada

A partir dessa nova dosagem foram determinados os parâmetros de dosagem Marshall (Figura 24), observando-se que o teor de ligante de projeto sofreu uma redução, passando de 4,6% para 4,2% com a incorporação de cal hidratada, e dessa forma adequando-se o volume de vazios à preconizada pela norma.

Os parâmetros de dosagem das misturas com ligante convencional (CAP 50/70) e ligante modificado (CAP 60/85-E), com e sem incorporação de cal, são apresentados nas Figuras 24 e 25. Previamente, são apresentadas as Tabelas 12 e 13 com os resultados destes parâmetros para os teores de projeto.

Para as misturas com incorporação de cal hidratada obteve-se uma leve redução do teor de ligante de projeto, em função da redução do volume de vazios, de 4,6% para 4,2% em misturas com ligante convencional e de 4,7% para 4,5% em misturas com ligante modificado. Foi observada uma pequena diferença no teor de ligante de projeto das misturas conforme o tipo de cal incorporada, porém como essa diferença era muito pequena (0,1%), optou-se por adotar o mesmo teor de ligante de projeto para as misturas com cal calcítica ou dolomítica.

Tabela 12: Resultados para misturas com ligante convencional CAP 50/70 nos teores de projeto (Referência, Cal Calcítica e Cal Dolomítica)

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

Tabela 13: Resultados para misturas com ligante modificado CAP 60/85-E nos teores de projeto (Referência, Cal Calcítica e Cal Dolomítica)

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

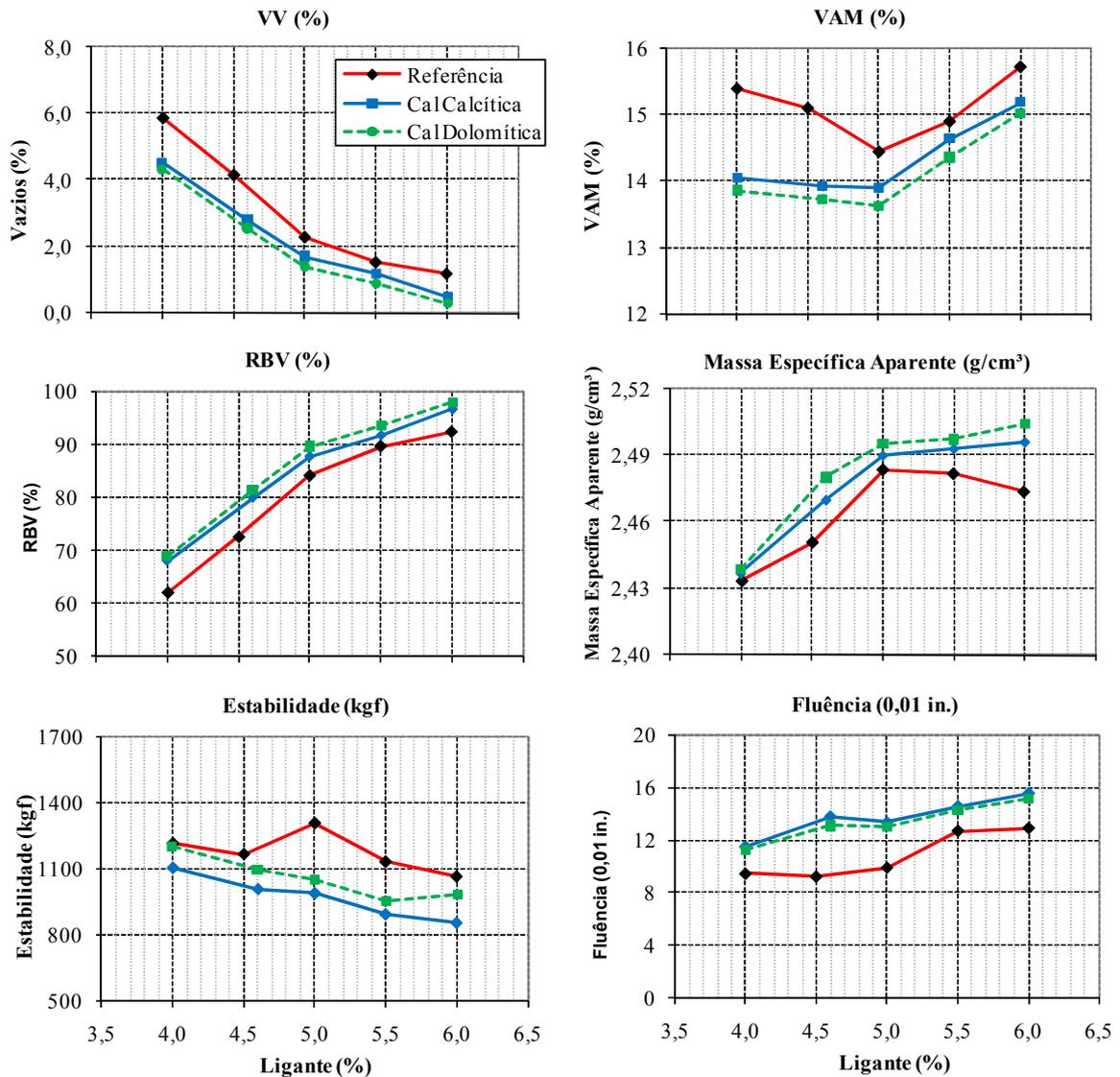


Figura 24: Parâmetros de Dosagem Marshall (CAP 50/70) das misturas com incorporação de Cal calcítica (CC) e cal dolomítica (CD) em relação à mistura de Referência

Para todas as misturas em análise, a tendência de variação dos parâmetros de dosagem foi idêntica, ainda que as mesmas fossem menores nas misturas com ligante modificado, quando comparadas com as misturas preparadas com ligante convencional.

Além da redução do volume de vazios, e conseqüentemente, do teor de ligante de projeto para adequação, observa-se que para as misturas com incorporação de cal há um aumento da relação betume vazios (RBV) considerando o mesmo teor de ligante.

Outro fato observado, ao analisarem-se os parâmetros de dosagem das misturas, foi o aumento na fluência e a diminuição da estabilidade das misturas com cal, embora todos os valores encontram-se dentro dos limites especificados.

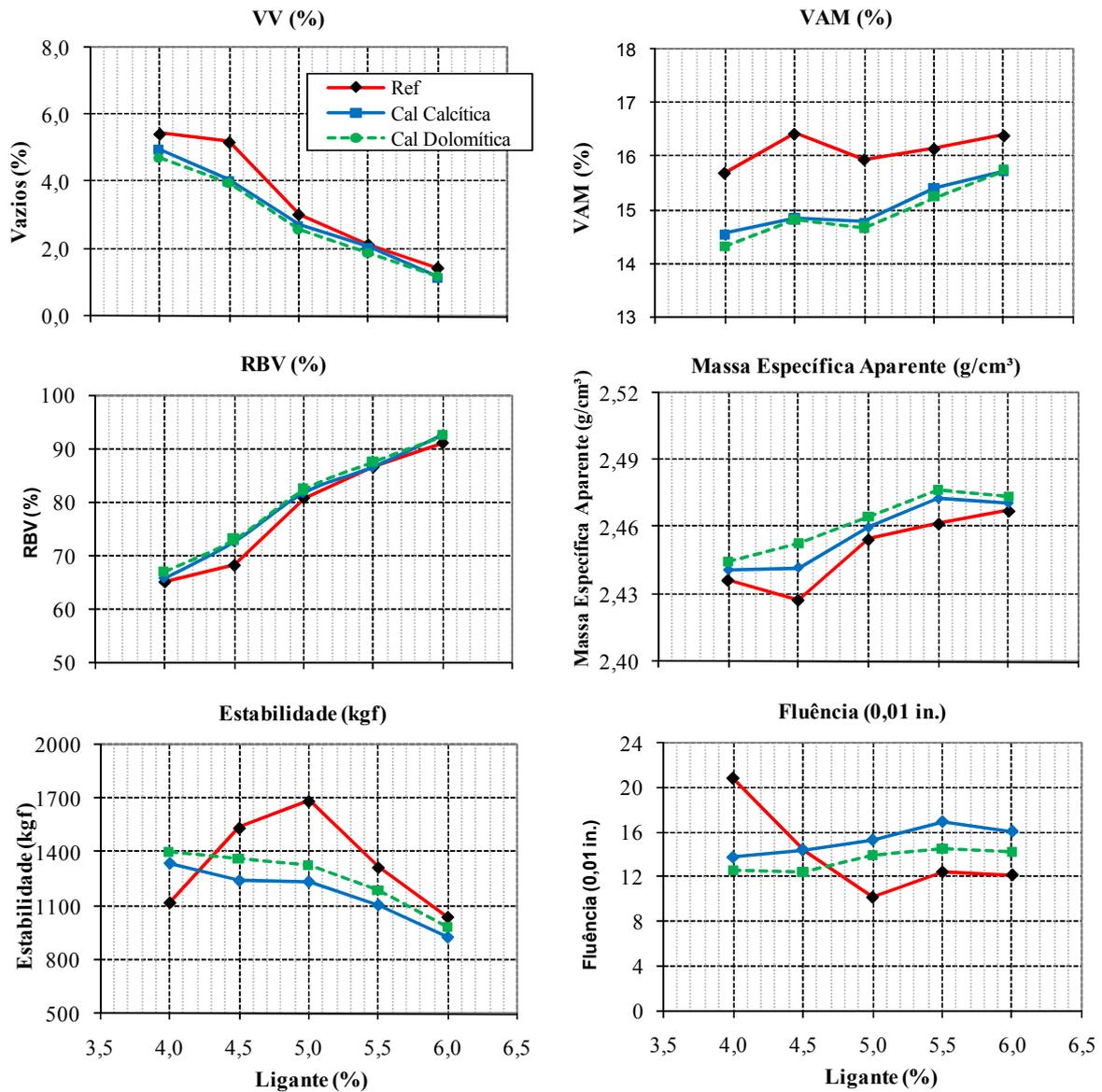


Figura 25: Parâmetros de Dosagem Marshall (CAP 60/85-E) das misturas com incorporação de Cal calcítica (CC) e cal dolomítica (CD) em relação à mistura de Referência

Na Tabela 10 verifica-se que para os teores de projeto (4,6% na mistura de Referência e 4,2% misturas com cal) os valores de RBV foram bastante semelhantes, sendo inferiores ao limite especificado. Além disso, as misturas com incorporação de cal hidratada apresentaram diminuição de VAM de 1% em relação à mistura de Referência, que já apresentava 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.

4.1.2 Resistência e módulo de resiliência

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

Nas misturas com ligante convencional (CAP 50/70), nas quais se manteve constante o teor de ligante, a incorporação de cal provocou uma redução de RT da ordem de 18%. Já nas misturas em que foi realizado um projeto específico para a nova composição mineral (com teor de ligante ligeiramente inferior ao da mistura de Referência) observou-se um notável aumento na RT das misturas. Na Figura 26 pode-se observar que esse aumento foi maior para as misturas com cal calcítica (20%) do que para as misturas com cal dolomítica (cerca de 15%).

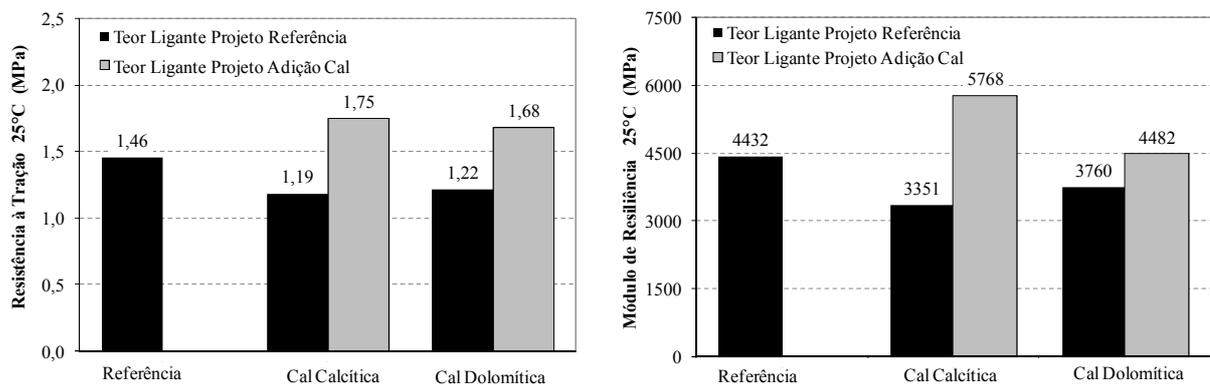


Figura 26: Efeitos da incorporação de cales na resistência à tração e no módulo de resiliência a 25°C em misturas com CAP 50/70 (RT e MR em MPa)

Como mencionado anteriormente, as misturas nas quais se fez simples substituição de material podem estar com excesso de ligante, por isso apresentando resistência menor do que a mistura de Referência (excesso de ligante asfáltico acaba “lubrificando” demasiadamente os agregados diminuindo seu intertravamento). Evidencia-se dessa forma, a necessidade de um projeto específico para as misturas nas quais realiza-se incorporação de cal.

Para as misturas projetadas levando em conta a incorporação de cal, mesmo com redução do teor de ligante, houve um desempenho superior (maior resistência com incorporação de cal calcítica) (Figura 26).

Da mesma forma que ocorreu com a RT, observou-se que nas misturas com simples substituição houve uma redução do MR (da ordem de 20% para as duas cales). Já nas misturas em que foi realizado projeto específico observou-se um notável aumento do MR. Este aumento foi maior para as misturas com emprego de cal calcítica (30%), com um aumento discreto da ordem de 1,15% para misturas com cal dolomítica. De forma bastante notável evidencia-se a importância do tipo de cal empregada.

Análise semelhante foi realizada para misturas com ligante modificado (CAP 60/85-E). Observou-se a mesma tendência, ou seja, com um projeto específico as misturas com incorporação de cal apresentaram um aumento de RT, sendo este aumento da ordem de 19% e 21% nas misturas com incorporação de cal calcítica e dolomítica, respectivamente.

Ao contrário do que ocorreu nas misturas com ligante convencional, nas misturas com ligante modificado, quando a mesma foi projetada com incorporação de cal, houve uma diminuição de RT da mistura da ordem de 24% (em relação à mistura de Referência), enquanto para misturas com ligante convencional a incorporação de cal provocou um aumento de RT da ordem de 15% a 20%, conforme demonstrado nos gráficos anteriores.

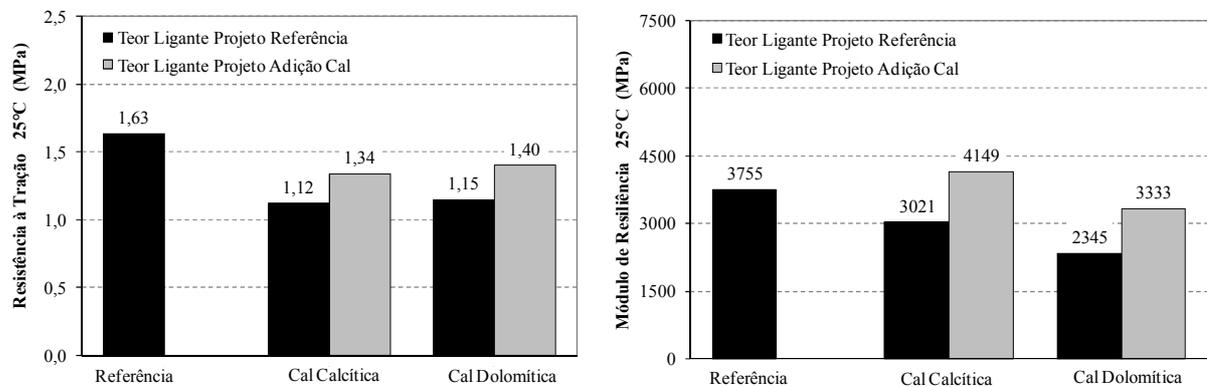


Figura 27: Efeitos da incorporação de cales na resistência à tração e no módulo de resiliência a 25°C em misturas com CAP 60/85-E (RT e MR em MPa)

Quando comparados os resultados de RT das misturas com cal calcítica e dolomítica não houve uma diferença significativa nos resultados. Um leve aumento na RT para misturas com cal dolomítica foi observado, porém sendo a mesma ainda abaixo do valor de Referência.

Como pode ser observado na Figura 27, a adição de cal não teve efeitos significativos na RT e no MR das misturas elaboradas com ligante polimerizado; as variações foram bem discretas, com um leve aumento apenas no MR das misturas com cal calcítica.

Estes resultados serão discutidos mais detalhadamente a seguir, ao analisar-se os resultados destes ensaios a diferentes temperaturas e com processo de condicionamento das amostras.

A diminuição de RT para misturas com ligante modificado pode estar sendo provocada por reações da cal com componentes ácidos do modificador, que podem estar neutralizando a ação da cal, não demonstrando o mesmo efeito que ocorreu com o ligante convencional (principalmente aumento de RT).

4.1.3 Adesividade

Para evidenciar a influência do teor de ligante nas misturas, falta ou excesso, fato que pode estar causando a redução de volume de vazios nas misturas em que houve simples substituição de material da curva granulométrica, realizou-se a verificação da adesividade das misturas através da metodologia Lottman Modificada, considerando-se as misturas com e sem projeto específico. Os resultados de Resistência Retida à Tração (RRT) para misturas com ligante convencional e modificado são apresentados na Figura 28.

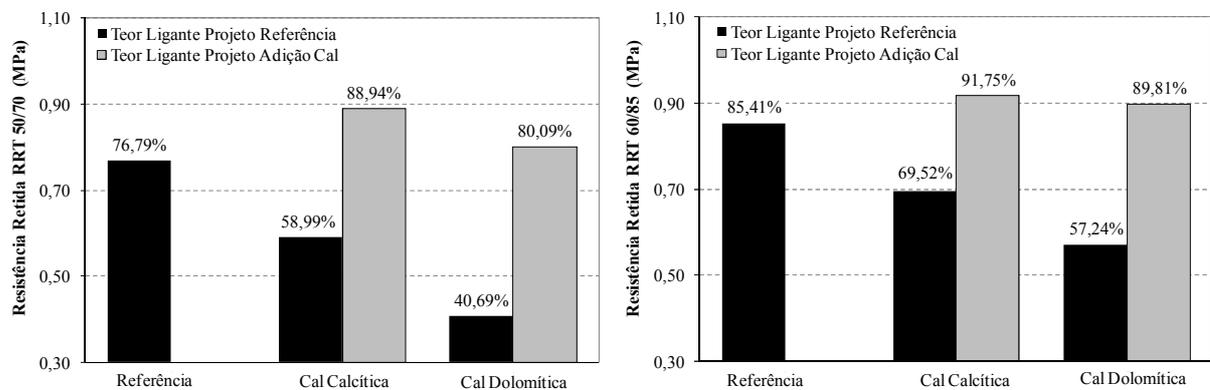


Figura 28: Efeitos da incorporação de cales na resistência retida à tração a 25°C em misturas com CAP 50/70 e CAP 60/85-E (%)

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

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

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

4.1.4 Considerações finais sobre a abordagem adotada e verificação da eficiência do teor de cal hidratada incorporado nas misturas projetadas

Levando em consideração os resultados preliminares apresentados anteriormente, definiu-se que a metodologia de análise a ser adotada era aquela em que se fixava o volume de vazios das misturas e realizava-se uma dosagem específica para a composição granulométrica gerada com a incorporação de 1% de cal hidratada (substituição de 1% de pó-de-pedra pela mesma quantidade de cal hidratada).

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

Decidiu-se, então, realizar-se mais uma análise em que foram comparados resultados de resistência, módulo e adesividade de misturas com 1% e 2% de cal hidratada.

Na Figura 29 são apresentados os resultados absolutos dos ensaios de módulo de resiliência (MR) e resistência à tração (RT). Já na Figura 30 são apresentadas as variações percentuais dos resultados de MR e de RT das misturas com ligante convencional e modificado, com incorporação de 1% e 2% de cal.

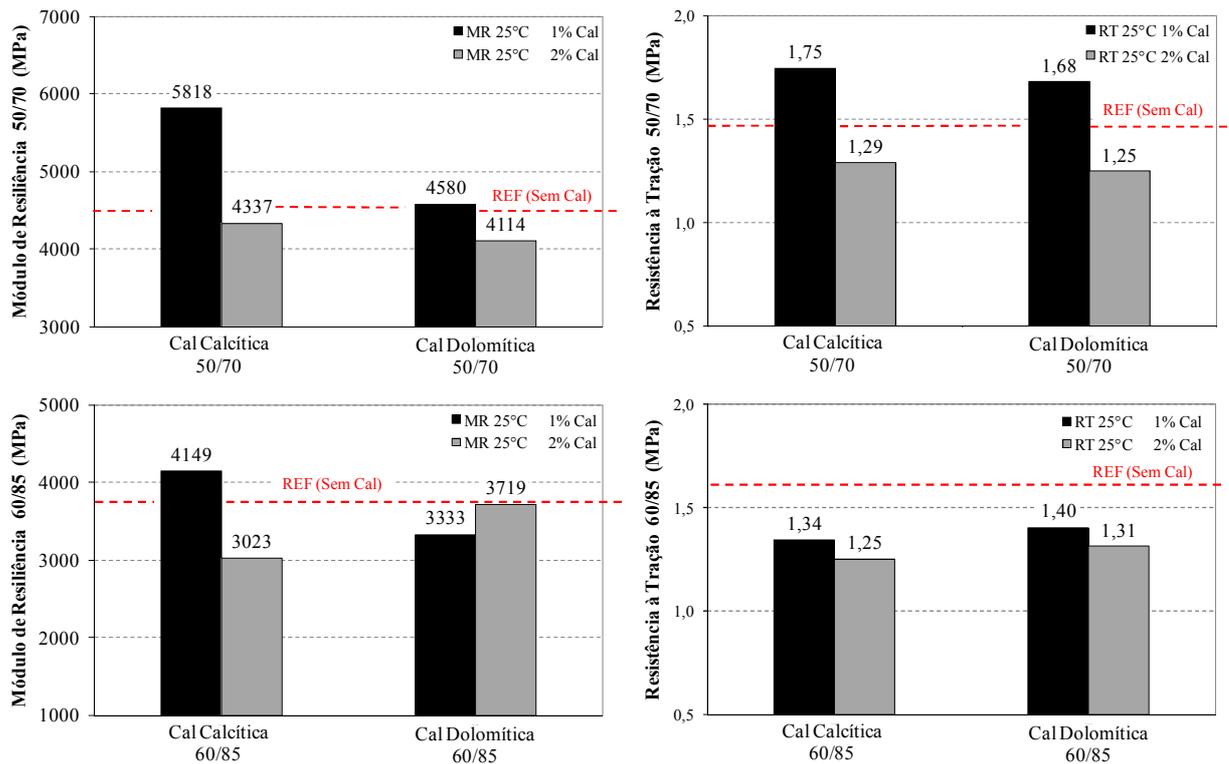


Figura 29: Resultados comparativos de módulo de resiliência e resistência à tração (em MPa) para misturas com ligante convencional e modificado e incorporação de 1% e 2% de cal

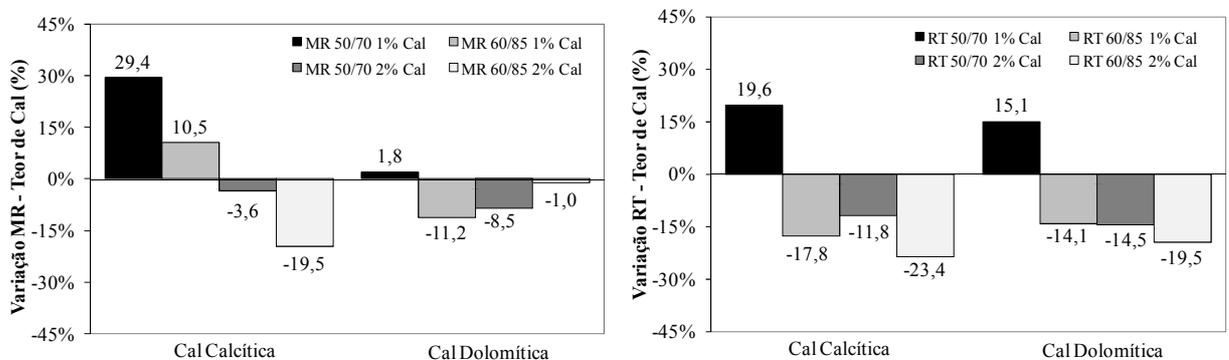


Figura 30: Variações percentuais de módulo de resiliência e resistência à tração de misturas com ligante convencional e modificado e incorporação de 1% e 2% de cal

Quanto ao MR das misturas constata-se que:

- Quando foi incorporada cal calcítica (1%) ocorreu um aumento de MR em relação às misturas de Referência independentemente do tipo de ligante, embora com aumento mais significativo em misturas com ligante convencional (29,4% contra 10,5%). Com incorporação de 2% de cal ocorreu uma queda de MR, sendo esta mais acentuada para misturas com ligante modificado (19,5% contra 3,6%).

- Quando foi incorporada cal dolomítica (1%) à mistura com ligante convencional ocorreu um discreto aumento do módulo (1,8%), registrando-se, de forma contrária, redução do MR em todas as outras composições (com ligante convencional com 2% de cal e com ligante modificado e 1% e 2%). Destaca-se a queda mais significativa de 11,2% no MR da mistura com ligante modificado e 1% de cal.

Quanto à RT observou-se o seguinte comportamento:

- Aumentos de RT somente foram observados em misturas com ligante convencional e 1% de incorporação de cal (19,6% para cal calcítica e 15,1% para cal dolomítica). Em todos os outros casos ocorreram diminuições nas resistências das misturas com valores médios da ordem de 16%.

Observa-se que os resultados, tanto de resistência quanto de módulo, foram ligeiramente superiores quando se utilizou teores de 1% de cal. Esta constatação alinha-se com resultados nacionais de Núñez *et al.* (2007), e com a experiência dos EUA, onde geralmente os teores ótimos de cal estão compreendidos entre 1% e 2%, com relação ao peso seco dos agregados pétreos.

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

Um fato a ser discutido mais adiante está relacionado principalmente à resistência das misturas com ligante modificado (CAP 60/85-E). Observa-se na Figura 30 que as mesmas apresentaram uma redução de resistência quando apresentam incorporação de cal, tanto calcítica quanto dolomítica.

Para definição de um teor ideal de incorporação de cal, foi realizada uma análise comparativa entre misturas com incorporação de 1% e 2% de cal hidratada através da Metodologia Lottman Modificada, definindo assim a Resistência Retida à Tração (RRT) das misturas. Nesta metodologia verificou-se a influência do teor e do tipo de cal empregada nas misturas.

Com os resultados obtidos em relação à adesividade das misturas asfálticas, considerando o efeito deletério da água, apesar das amostras de Referência apresentar um bom desempenho (76,79% para misturas com CAP 50/70 e 85,41% com CAP 60/85-E), a incorporação de 1% de cal proporcionou uma melhoria considerável, elevando substancialmente os valores de RRT.

Na Tabela 14 e na Figura 31 são apresentados os resultados de RRT para misturas preparadas com ligante convencional e modificado, com 1% e 2% de incorporação de cal.

Tabela 14: Resultados de RRT para misturas com incorporação de 1% e 2% de cal

Mistura	Valores Médios Resistência à Tração (1% cal)			Valores Médios Resistência à Tração (2% cal)		
	N. Cond.	Cond.	RRT	N. Cond.	Cond.	RRT
50/70 REF	0,56	0,43	76,79%	0,56	0,43	76,79%
50/70 + CC	0,75	0,67	88,94%	0,53	0,42	78,13%
50/70 + CD	0,77	0,62	80,09%	0,49	0,35	72,48%
60/85 REF	0,62	0,53	85,41%	0,56	0,43	76,79%
60/85 + CC	0,65	0,59	91,75%	0,58	0,50	86,34%
60/85 + CD	0,69	0,60	86,89%	0,53	0,43	80,67%

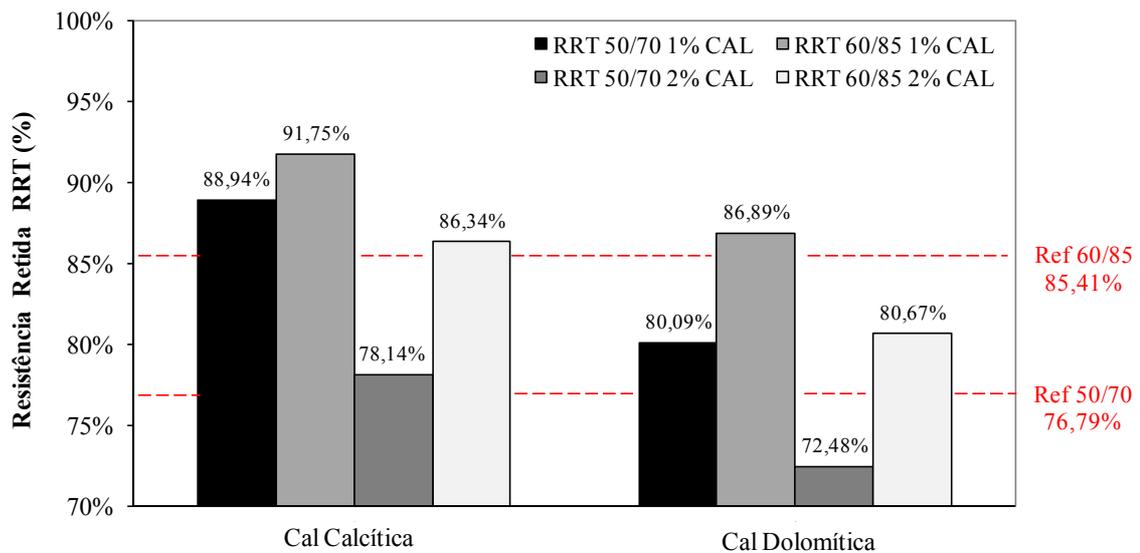


Figura 31: Comparativo de RRT para misturas com 1% e 2% de cal (%)

De forma geral, as misturas projetadas com ligante modificado apresentaram valores mais elevados de RRT quando comparadas com as misturas com ligante convencional, conforme esperado. Após a incorporação de cal nas misturas, sua ação foi mais pronunciada com ligante convencional.

Misturas com incorporação de 1% de cal calcítica apresentaram um aumento significativo de RRT, melhorando a adesividade das misturas em até 12% em relação à mistura de Referência quando utilizado ligante convencional (CAP 50/70) e 6,3% com ligante modificado (CAP 60/85-E).

No gráfico da Figura 32, estão representadas as variações percentuais de RRT para ambos os tipos de ligante em função do teor de cal incorporado na mistura.

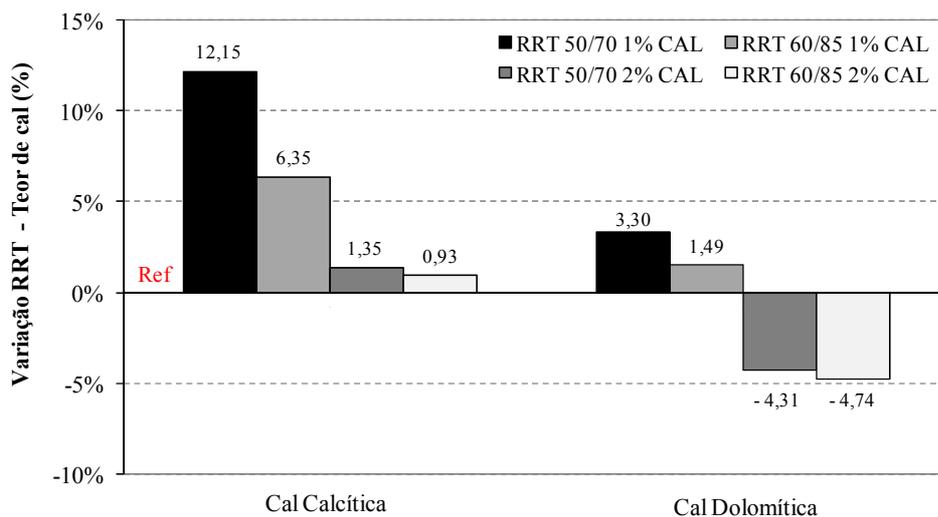


Figura 32: Variação RRT de misturas com ligante convencional e modificado com incorporação de 1% e 2% de cal hidratada (MPa)

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

O tipo de cal também influenciou significativamente os resultados. De forma geral, a cal calcítica apresentou desempenho superior à cal dolomítica (8,85% superior com ligante convencional e 4,86% com ligante modificado).

Ao incorporar-se 2% de cal calcítica não houve aumento significativo de RRT, tanto para misturas com ligante convencional quanto modificado (aumentos da ordem de 1%). Quando este comparativo é realizado com cal dolomítica, as misturas apresentaram RRT em torno de 4,5% inferior às misturas de Referência, ou seja, a incorporação de cal nestas condições não proporcionou nenhuma melhoria à mistura, muito pelo contrário.

Concluindo sobre a forma de análise da influência da incorporação de cal nas misturas asfálticas definiu-se a linha de projeto a ser seguida, ou seja, determinou-se que a melhor forma de incorporação de cal é aquela em que se utiliza um projeto específico e o teor ideal de cal a ser adotado, para os materiais utilizados nesta pesquisa corresponde a 1%.

Na Tabela 15 é apresentado um resumo das propriedades analisadas com incorporação de 1% e 2% de cal com variações positivas (aumentos) e negativas (diminuições).

Tabela 15: Variação dos resultados de RRT, RT e MR com incorporação de 1% e 2% de cal

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

Referente à forma de incorporação, conforme visto na revisão bibliográfica, as várias maneiras de adicionar cal são vistos como possíveis de permitir que os efeitos benéficos da cal hidratada possam se desenvolver. Contudo estes efeitos são mais pronunciados quando a cal é adicionada diretamente sobre o agregado graúdo, principalmente na melhoria de adesividade. Em decorrência da análise destes dados definiu-se a forma de incorporação de cal como sendo aquela em que a mesma é adicionada na forma seca sobre o agregado graúdo.

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

Mesmo com redução do teor de ligante das misturas, o que representa economia no processo de produção, houve um desempenho superior nas misturas com incorporação de cal. Ressalta-se que o objetivo deste trabalho não está focado na economia de material, como por exemplo, de ligante asfáltico, mas sim na metodologia que proporcione o melhor desempenho.

Após a definição de abordagem a ser adotada procedeu-se com a moldagem das amostras para a realização dos ensaios descritos a seguir.

4.2 CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DAS MISTURAS

Apresenta-se a seguir os resultados dos ensaios de resistência a tração (RT) e módulo de resiliência (MR) para as misturas preparadas com ligante convencional (CAP 50/70) e ligante modificado (CAP 60/85-E) com incorporação de cal calcítica e cal dolomítica, com ensaios realizados nas temperaturas de 25°C e 35°C antes e após processo de condicionamento das amostras conforme descrito anteriormente na metodologia.

Os resultados são apresentados em uma sequência de gráficos onde temos:

- a) Resultados de RT e MR das misturas nas temperaturas de 25°C e 35°C com o objetivo de evidenciar as influências proporcionadas pela incorporação de cal. Além disso, são apresentados resultados antes e após um processo de condicionamento (SC – Sem Condicionamento e CC – Com Condicionamento) que foi realizado com o objetivo de simular um envelhecimento das amostras;
- b) Variações sofridas em função do processo de condicionamento para as duas temperaturas de ensaio (25°C e 35°C);
- c) Valor de resistência retida ou módulo retido em função das diferentes temperaturas de ensaio (RT 35°C/RT 25°C e MR 35°C/MR 25°C).

4.2.1 Resistência à tração (RT)

De forma a facilitar a análise e o entendimento dos resultados, os mesmos são apresentados em seções, serão divididos em análise da influência da cal hidratada, do condicionamento e da temperatura conforme apresentados na Figura 33 (a, b e c).

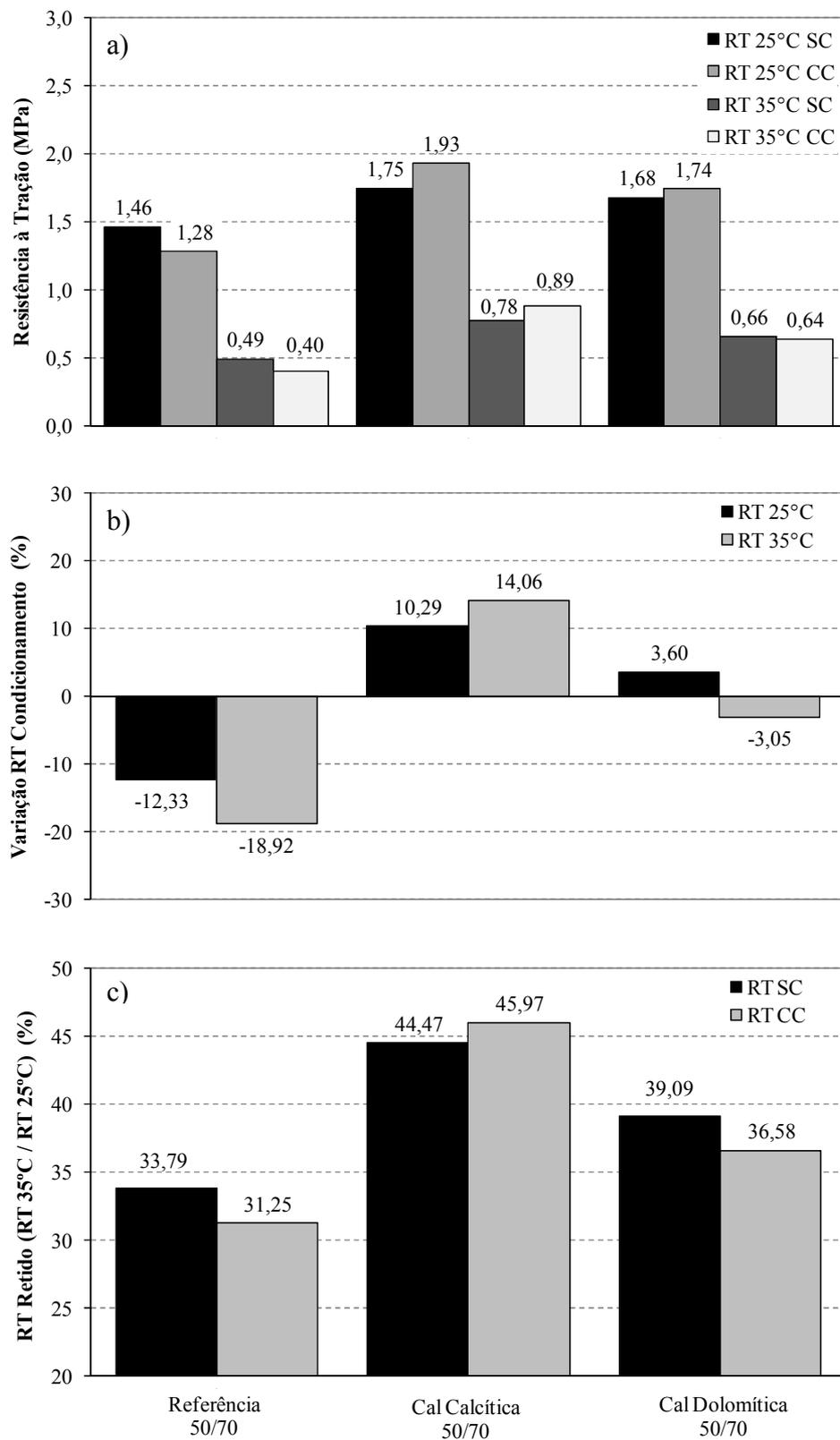


Figura 33: Resistência à tração de misturas com CAP 50/70; a) para temperaturas distintas com e sem condicionamento das amostras; b) Variação da RT com o condicionamento; c) RT retido em função da temperatura

Para a análise da influência promovida pela incorporação de cal e considerando uma mesma temperatura de ensaio, a mesma proporcionou um aumento significativo de RT para ambos os tipos de cal incorporada, porém para a cal calcítica os resultados foram mais expressivos, com aumentos de até 20% em relação à Referência e 5% superiores à cal dolomítica (Figura 33 a).

Estes 20% de aumento de RT proporcionados simplesmente pela ação da cal demonstram a ação benéfica de sua incorporação como filer ativo, interagindo com os componentes da mistura e gerando um produto de desempenho superior.

Levando em consideração o condicionamento das amostras ficou evidenciado de forma bastante clara a ação positiva da cal nas misturas asfálticas após determinado período de exposição à condicionantes nocivos (ação deletéria da água e envelhecimento em estufa).

Misturas nas quais não houve incorporação de cal apresentaram uma queda na resistência após o processo de condicionamento (cerca de 12% de diminuição para temperatura de ensaio de 25°C e 19% para 35°C). Quando foi incorporada cal calcítica nas misturas, observaram-se aumentos significativos na resistência (de 10% com 25°C de temperatura de ensaio e 14% para ensaios realizados a 35°C).

Misturas com cal dolomítica não apresentaram variações significativas, com aumentos da ordem de 3% para 25°C e diminuição da mesma ordem para temperaturas de ensaios de 35°C, conforme gráfico da Figura 33 b.

Como visto nos resultados anteriores novamente a cal calcítica mostrou-se mais efetiva na melhoria, ou neste caso, na manutenção das propriedades da mistura, pois as misturas com sua incorporação, ao contrário das misturas sem cal, não apresentaram queda na resistência após processo de condicionamento. A cal dolomítica também apresentou influência importante, evitando a queda da resistência devido ao processo de condicionamento das amostras.

Levando em consideração o fato de a cal hidratada ter influência mais pronunciada na rigidez das misturas asfálticas em temperaturas acima da temperatura ambiente, conforme descrito em diversos trabalhos internacionais e mencionado na revisão bibliográfica, realizaram-se ensaios de RT e MR na temperatura ambiente de 25°C e também em uma temperatura mais elevada, neste caso 35°C para verificação deste fato.

Para os materiais utilizados nesta pesquisa, constatou-se como sendo verdadeira essa afirmação, pois as misturas tratadas com cal apresentaram uma melhor manutenção de sua resistência na temperatura mais elevada (35°C).

Apresentando o melhor desempenho neste quesito, as misturas tratadas com cal calcítica tiveram uma resistência retida de 44,5% para misturas sem condicionamento, enquanto a mistura de Referência apresentou 33,8% e misturas com cal dolomítica 39% (Figura 33 c).

Quando se leva em conta o processo de condicionamento, somente a mistura com incorporação de cal calcítica apresentou aumento de RT retido (1,5%) enquanto a mistura de Referência e com cal dolomítica apresentaram queda de aproximadamente 2,5%.

Comprova-se que utilizando uma cal de boa qualidade, mesmo após o processo de condicionamento com efeito deletério da água e envelhecimento em estufa, é possível uma manutenção e até aumento de resistência das misturas, o que não ocorre nas misturas sem cal e de forma menos efetiva em misturas com cal dolomítica.

Para caracterizar os efeitos da cal em misturas preparadas com ligantes modificados com polímeros realizou-se a mesma série de ensaios realizados para as misturas com ligante convencional, conforme descrito anteriormente.

Ao contrário do que ocorreu nas misturas com ligante convencional, a incorporação de cal provocou uma diminuição de RT para ambos os tipos de cal (17,8% para cal calcítica e 14,1% para cal dolomítica) (Figura 34 a).

Neste caso a cal calcítica contribuiu de forma mais significativa para uma diminuição da resistência, isso provavelmente acontece devido a reações que ocorrem entre os componentes modificadores do ligante e os componentes da cal.

Esta diminuição de resistência em misturas com ligantes modificados abre uma nova linha de questionamentos. A necessidade de verificação de quais componentes modificadores podem ser responsáveis por esse comportamento, e quais possíveis reações podem ser esperadas a partir de incorporação de cal em ligantes com outros modificadores; quais componentes dos modificadores reagem com os componentes da cal, e se ocorrem reações de neutralização que impedem a ação da cal nas misturas, como no caso aumento de resistência.

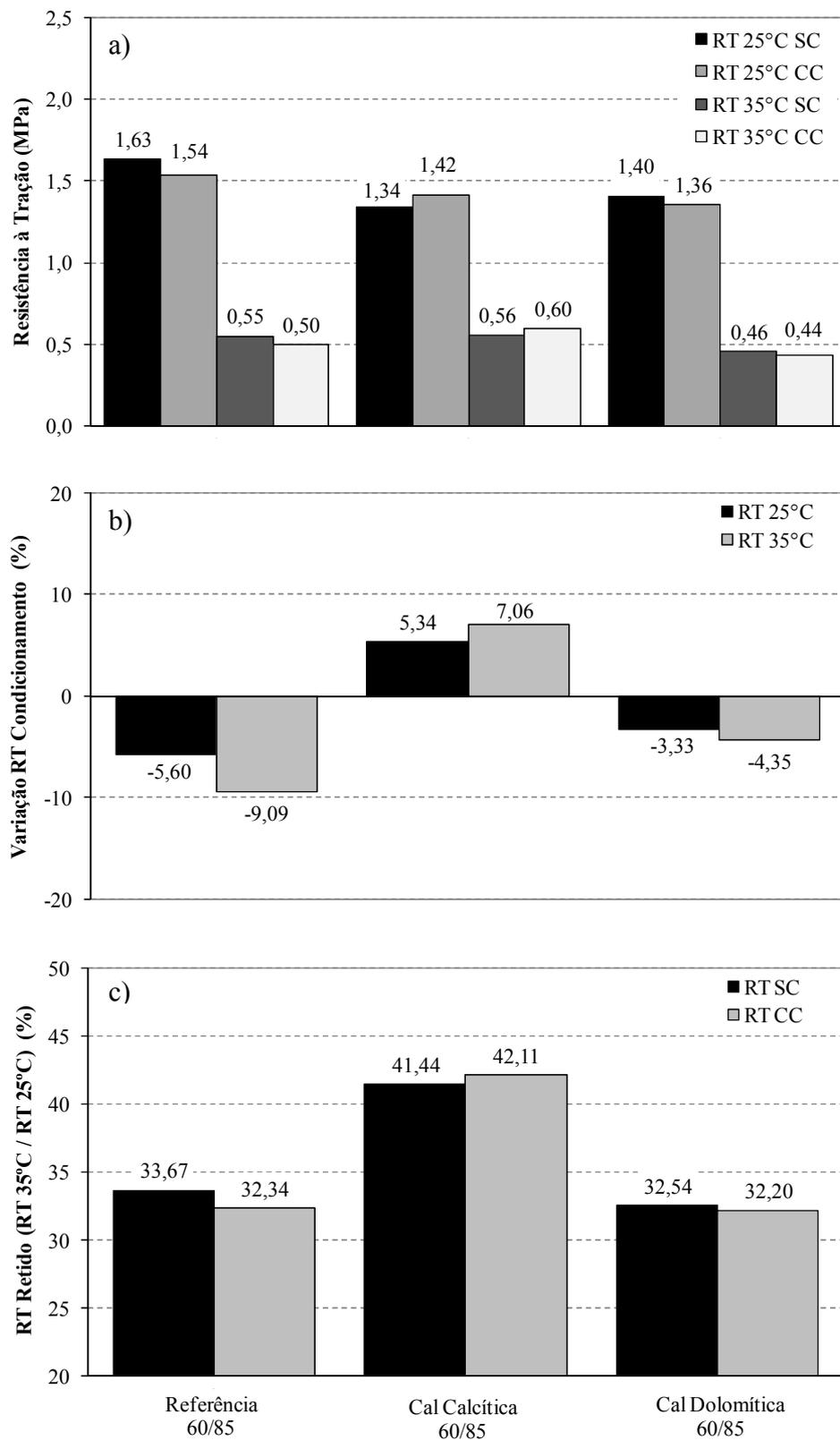


Figura 34: Resistência à tração de misturas com CAP 60/85-E; a) para temperaturas distintas com e sem condicionamento das amostras; b) Variação da RT com o condicionamento; c) RT retido em função da temperatura

Um fator interessante observado foi o efeito do tipo de ligante empregado nas misturas. A partir da comparação dos resultados das misturas com ligante convencional e ligante modificado (sem incorporação de cal) observa-se que as amostras com ligante convencional são mais suscetíveis ao processo de condicionamento.

Amostras com ligante convencional apresentaram uma queda de resistência da ordem de 12,33% quando ensaiadas a 25°C e de 18,92% quando o ensaio foi realizado a temperatura de 35°C, enquanto que para as amostras com ligante modificado esta queda de resistência foi inferior, ficando limitada a 5,60% para ensaios a 25°C e 9,09% para ensaios a 35°C.

Essa diferença na perda de resistência, correspondendo praticamente à metade da perda que sofreram as amostras com ligante convencional, deve-se provavelmente à influência dos modificadores elastoméricos na resistência à degradação das amostras que foram submetidas ao processo de condicionamento.

Nas misturas com incorporação de cal, somente a cal calcítica foi capaz de proporcionar um aumento na resistência após o processo de condicionamento para ambas as temperaturas de ensaio (média de 6,2%), tanto as misturas sem cal como as com cal dolomítica apresentaram uma queda de resistência (média de 7,5% e 3,8% respectivamente) (Figura 34 b).

A queda um pouco mais discreta para as misturas com cal dolomítica possivelmente está associada com a ação da cal, mas como a mesma não é de uma qualidade superior, seus resultados não chegaram a evitar uma queda de resistência devido ao processo de condicionamento como foi possível observar nas misturas com cal calcítica.

Como visto nos resultados anteriores, no caso das misturas com ligante modificado a cal calcítica mostrou-se novamente mais efetiva na manutenção das propriedades da mistura (comparando resultados antes e após processo de condicionamento), porém, em uma análise global houve uma diminuição de resistência das misturas quando as mesmas apresentam incorporação de cal.

Considerando a ação da cal na manutenção das propriedades da mistura com a elevação da temperatura, a cal calcítica foi mais efetiva, com valores cerca de 8% superiores em comparação com a mistura sem incorporação de cal. Misturas com cal dolomítica não apresentaram variações significativas em relação à Referência (Figura 34 c).

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

Concluindo sobre os resultados de RT das misturas analisadas, observou-se que em misturas com ligante modificado ocorreu o contrário do que com ligante convencional, em que a incorporação de cal na mistura proporcionou um aumento significativo de RT. Para misturas com ligante modificado poderia se cogitar a hipótese de ser necessária uma quantidade maior de cal, mas fazendo isso conforme visto anteriormente no gráfico da Figura 30, a RT sofreu uma queda ainda maior (queda de 17,8% para 23,4% considerando cal calcítica e de 14,1% para 19,5 considerando cal dolomítica).

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

4.2.2 Módulo de resiliência (MR)

Os resultados de módulo de resiliência são apresentados da mesma forma que os resultados de resistência à tração foram apresentados anteriormente, ou seja, divididos em seções onde é realizada análise da influência da cal hidratada, do condicionamento e da temperatura conforme apresentados na Figura 35 (a, b e c).

Ao analisarmos a influência promovida pela cal nas misturas com ligante convencional (CAP 50/70) observa-se que um dos principais objetivos desta pesquisa, analisar a possibilidade de produzir concretos asfálticos de elevado desempenho e durabilidade através da incorporação de cal é possível, desde que a cal seja de boa qualidade (Figura 35 a).

Resultados obtidos com incorporação de cal calcítica proporcionaram um aumento de MR de praticamente 30% (de 4498 MPa para 5818 MPa). O que demonstra a necessidade de utilização de cal de boa qualidade (elevados teores de óxidos/hidróxidos de cálcio) são os resultados das misturas com cal dolomítica, que foram realizadas com o objetivo de ter um parâmetro comparativo para evidenciar a importância deste fator.

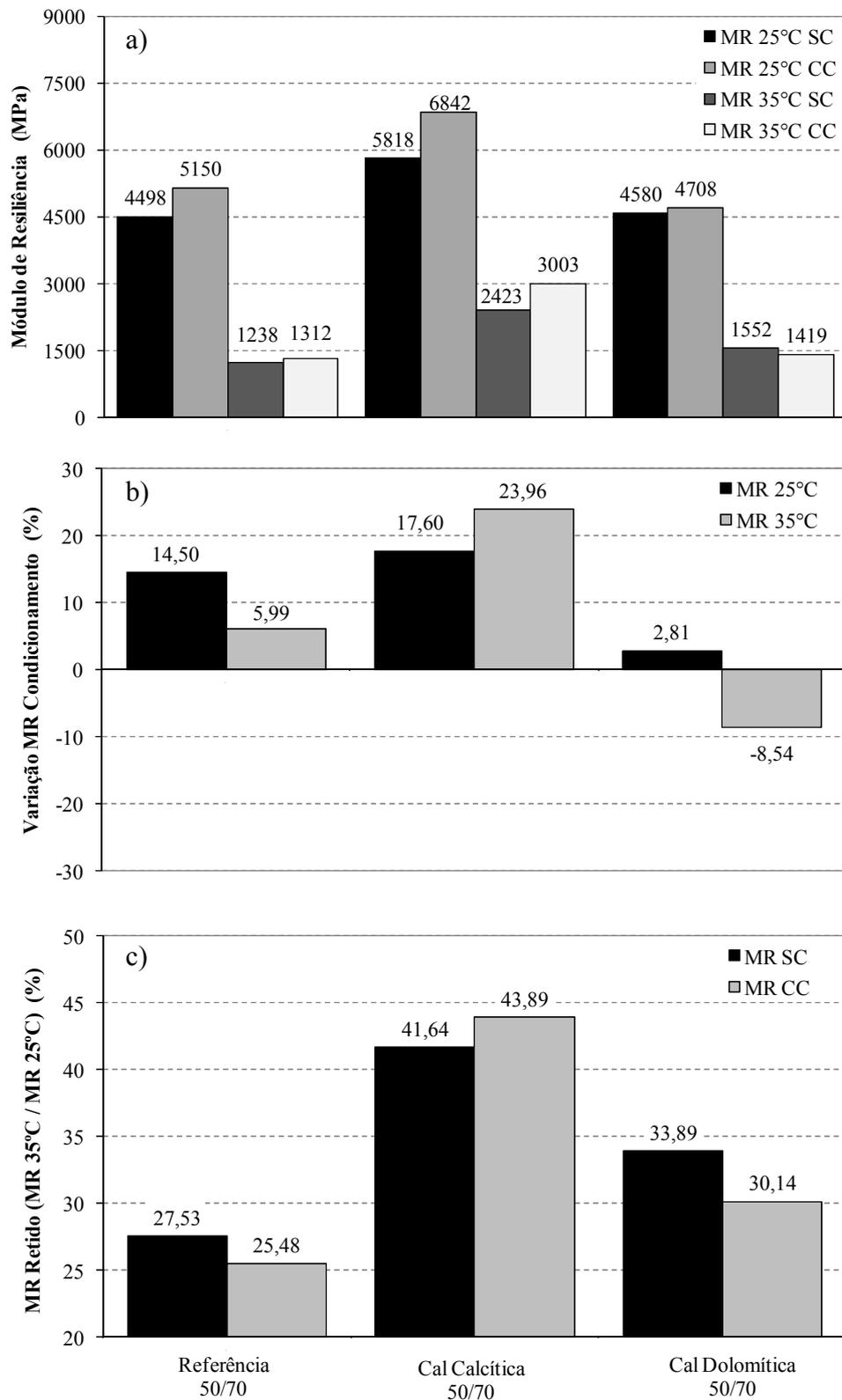


Figura 35: Módulo de resiliência de misturas com CAP 50/70; a) para temperaturas distintas com e sem condicionamento das amostras; b) Variação da RT com o condicionamento; c) RT retido em função da temperatura

Quando a incorporação realizada foi de cal dolomítica, os resultados foram muito semelhantes aos de misturas que não tiveram incorporação de cal, aumentos de MR foram inferiores a 2%, aumento de MR de 4498 MPa para 4580 MPa.

Misturas nas quais não houve incorporação de cal apresentaram um aumento de módulo (enrijecimento) após o processo de condicionamento (cerca de 14,5% de aumento para temperatura de ensaio de 25°C e 6% para 35°C). Um fator importante a ser lembrado está relacionado com a variação da RT frente ao processo de condicionamento. Como foi visto anteriormente, ocorreu uma diminuição de resistência de cerca de 12% (25°C) e 19% (35°C).

Esta incompatibilidade entre rigidez (aumento) e resistência (diminuição) é um fator prejudicial, misturas asfálticas mais rígidas sem aumento de resistência para acompanhar este aumento de rigidez proporcionam um comportamento mais frágil, conseqüentemente há uma maior suscetibilidade ao trincamento.

Em misturas com incorporação de cal calcítica, ocorreram aumentos de MR devido ao processo de condicionamento da ordem de 17% (25°C) e 24% (35°C) (Figura 35 b), mas ao contrário do que ocorreu nas misturas de referência, as misturas com incorporação de cal calcítica além de apresentar um aumento significativo de MR também apresentaram um aumento de RT para acompanhar este aumento de rigidez (10% para 25°C e 14% em 35°C), apresentando uma melhor compatibilização entre as duas propriedades. Esta configuração remete a misturas de elevado desempenho e durabilidade, conforme objetivos desta pesquisa.

Misturas com cal dolomítica não apresentaram variações significativas de MR, com aumentos da ordem de 2,8% para 25°C e diminuição de cerca de 8,5% para temperaturas de ensaios de 35°C, conforme gráfico da Figura 35 b. Variações de RT como visto anteriormente foram bastante semelhantes. De forma geral as misturas com incorporação de cal apresentaram uma melhor compatibilidade entre rigidez e resistência.

Ao realizar os ensaios a uma temperatura mais alta que a ambiente (35°C), as misturas de Referência tiveram uma queda de MR mais acentuada em relação às misturas com incorporação de cal (Figura 35 c). Misturas sem cal apresentando um MR retido (MR 35°C / MR 25°C) de 27,53% enquanto misturas com cal calcítica apresentaram reduções bem inferiores de MR, ficando com um MR retido da ordem de 41,64%.

Misturas com cal dolomítica apresentaram MR retido de 33,89%, mostrando a influência positiva da cal, porém não tão acentuada com a calcítica. Ao se levar em conta o processo de condicionamento, apenas as misturas com cal calcítica apresentaram um aumento de MR (2,25%) em função do condicionamento. Misturas de referência e com cal dolomítica apresentaram queda de 2,05% e 3,75%, respectivamente.

Concluindo, algumas observações importantes são pertinentes, como a importância do tipo de cal incorporada às misturas. Misturas com cal calcítica apresentaram comportamento diferenciado, principalmente no que diz respeito ao aumento de MR (segundo a premissa da pesquisa de produção de misturas de elevado desempenho através da incorporação de cal) com aumento compatível de resistência da mistura.

Outra característica importante observada foi a capacidade de manter o MR em temperaturas mais elevadas que a temperatura ambiente (Figura 35 c), o que vem a ser especialmente importante em misturas com ligante convencional que sofrem com graves problemas de deformação permanente nos períodos de verão em que as temperaturas do revestimento são bem elevadas, chegando próximas ou até mesmo acima do ponto de amolecimento do ligante.

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

Ao analisar o comportamento de misturas com cal dolomítica verificaram-se diminuições de MR (11,24%) configurando em um aumento de flexibilidade da mistura (Figura 36 a). Conforme visto anteriormente na análise de RT das misturas com ligante modificado, ocorreu uma diminuição de resistência para ambas as misturas com incorporação de cal (17,8% para cal calcítica e 14,1% para cal dolomítica).

Ao simular o envelhecimento das amostras através do processo de condicionamento surgiram comportamentos distintos entre as misturas analisadas (Figura 36 b). As misturas com cal, tanto calcítica quanto dolomítica apresentaram reduções de MR de 11,45% e 15,9% respectivamente.

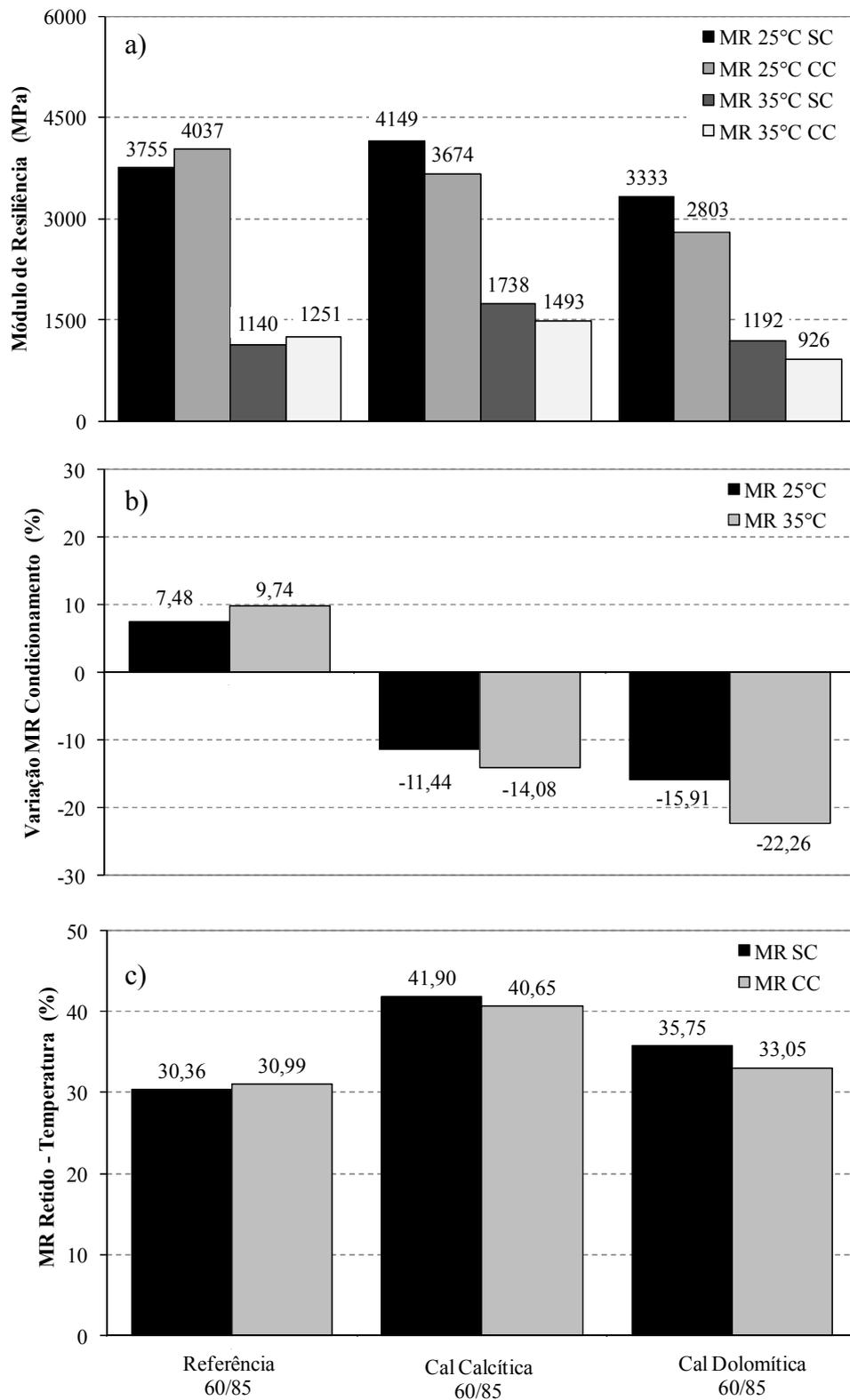


Figura 36: Módulo de resiliência de misturas com CAP 60/85-E; a) para temperaturas distintas com e sem condicionamento das amostras; b) Variação da RT com o condicionamento; c) RT retido em função da temperatura

Observa-se no mesmo gráfico que quando não há incorporação de cal ocorreu um aumento de rigidez discreto (7,5%) para a temperatura de 25°C, demonstrando uma mistura menos suscetível ao processo de condicionamento quando comparado com as misturas com ligante convencional, que apresentaram um aumento de quase 14,5% de MR em função deste mesmo processo, seguido de queda significativa de RT (queda duas vezes maior).

Misturas com cal calcítica apresentaram um comportamento diferenciado, com diminuição de MR (mais flexíveis) e aumento de RT, enquanto misturas sem cal se tornaram mais frágeis, com aumento de MR e diminuição de RT. Misturas com cal dolomítica apresentaram queda de MR e também de RT.

Em relação ao aumento de temperatura de ensaio o comportamento foi semelhante aos demais, com uma maior retenção de propriedades para as misturas com cal calcítica (Figura 36 c). Em misturas de referência com ligante modificado a queda de MR devido ao aumento da temperatura não foi tão acentuada, passando de 27,53% com ligante convencional para 30,36% com ligante modificado.

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

A queda de resistência observada nas misturas com ligante modificado pode estar relacionada ao fato de que já se tenha chegado a um “pico” de melhorias proporcionadas pelo modificador incorporado e o acréscimo de mais um modificador não é capaz de proporcionar melhorias adicionais nas propriedades da mistura, pois comparando com as misturas com ligante convencional, quando têm-se misturas com ligante modificado já parte-se de outro patamar, com resistência bem mais elevada. Um possível excesso pode estar provocando este comportamento. Além disso, ainda tem-se a hipótese de que possíveis reações de neutralização da cal pelo agente modificador do ligante asfáltico levam a este comportamento diferenciado quando comparado com o que ocorreu com ligante convencional (acrécimo de resistência e módulo).

Um resumo de todos os resultados obtidos nos ensaios de RT e MR nas temperaturas de ensaio de 25°C e 35°C, sem condicionamento e com condicionamento das amostras é apresentado na Tabela 16 (resultados em temperatura de ensaio de 25°C) e Tabela 17 (resultados em temperatura de ensaio de 35°C).

Tabela 16: Variação percentual das propriedades das misturas asfálticas em função da incorporação de cal e condicionamento das amostras (25°C)

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

Tabela 17: Variação percentual das propriedades das misturas asfálticas em função da incorporação de cal e condicionamento das amostras (35°C)

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

4.2.3 Análise comparativa: Ligante convencional+cal x Ligante modificado

Diante dos resultados analisados anteriormente, podemos chegar a um interessante comparativo, em que se demonstra a melhoria das propriedades e a superioridade das misturas com ligante convencional após incorporação de cal calcítica.

Conforme visto nos resultados de RT e MR apresentados anteriormente, ao comparar as misturas preparadas com ligante convencional e ligante modificado (ambas sem incorporação de cal), nota-se uma diferença principalmente na resistência das misturas, onde misturas com ligante modificado apresentavam uma RT de praticamente 12% maior. A diferença no MR das duas misturas foi de 16,5% (mistura com ligante modificado mais flexível).

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

Em relação ao MR, as misturas com ligante convencional já possuíam valores superiores nas misturas de referência (características da própria mistura, ligante modificado misturas mais flexíveis). Após a modificação das misturas com ligante convencional através da incorporação de cal atingiu-se valores bem mais elevados. É importante verificar a compatibilidade entre aumentos de rigidez e resistência após processo de condicionamento.

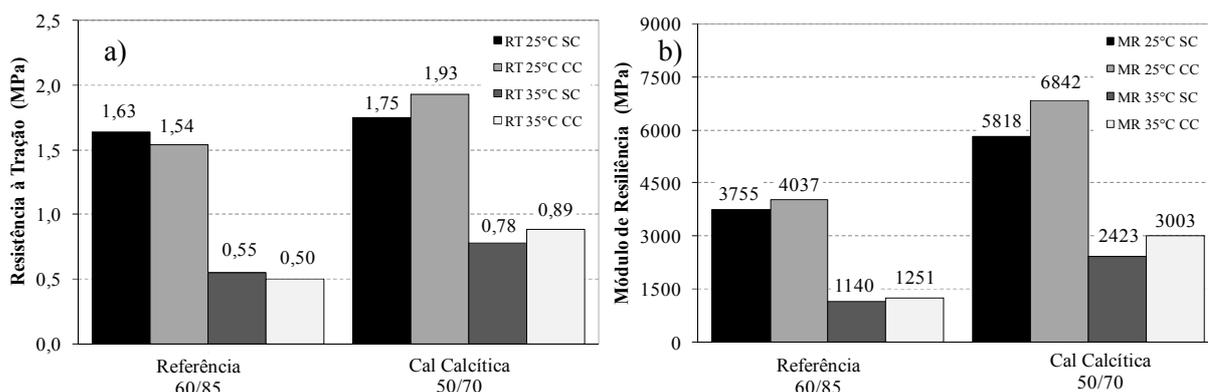


Figura 37: Resistência à tração e Módulo de resiliência para temperaturas distintas com e sem condicionamento das amostras (MPa)

Com o processo de condicionamento, através do qual se pretende simular um grau de degradação e envelhecimento das amostras, observou-se uma melhor resposta da mistura com ligante convencional e cal calcítica, conforme pode ser observado nos gráficos da Figura 38.

Enquanto a mistura com ligante modificado (Referência 60/85) apresentou uma queda de resistência (5,6% e 9,09% para 25°C e 35°C, respectivamente) e aumento de MR em proporções bastante semelhantes (7,48% e 9,74%), a mistura com ligante convencional e incorporação de cal calcítica apresentou um aumento de RT (10,29% e 14,06%) juntamente com um aumento de MR (17,6% e 23,96%).

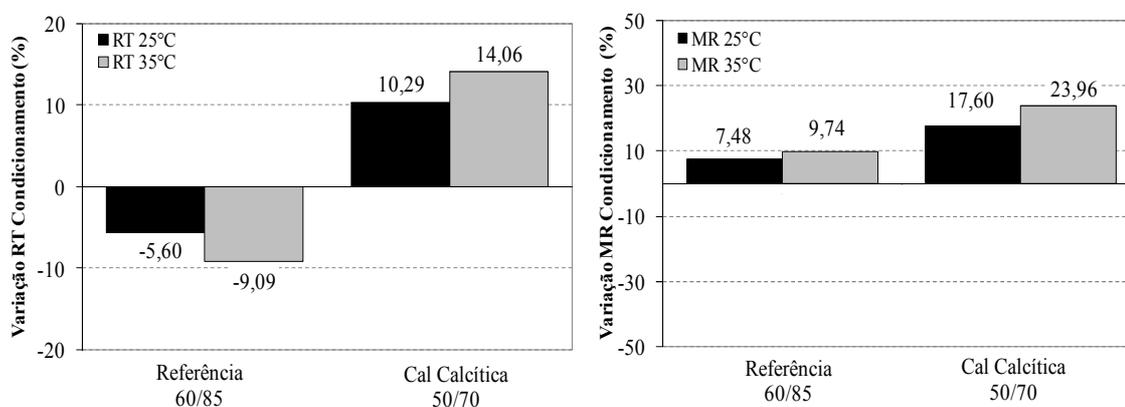


Figura 38: Variação de resistência à tração e módulo de resiliência em função do condicionamento para temperaturas distintas (%)

As duas misturas asfálticas aqui analisadas apresentam uma diferença de RT antes do condicionamento de 7,36%, após essa diferença sobe para 25,32%, uma diferença bastante significativa, em que a mistura com ligante convencional com incorporação de cal apresenta desempenho melhor que misturas com ligante modificado no que diz respeito à resistência.

Relacionando a capacidade de manter as propriedades da mistura em temperaturas maiores que a temperatura ambiente, fator descrito na literatura como sendo uma das características das misturas com cal hidratada (um efeito de sua incorporação), realizou-se esta análise juntamente com a mistura preparada com ligante modificado para verificar a diferença no comportamento proporcionado por um e outro modificador (Figura 39).

Para ambas as misturas, a retenção de RT ($RT\ 35^{\circ}C/RT\ 25^{\circ}C$) foi ligeiramente superior à retenção de MR ($MR\ 35^{\circ}C/MR\ 25^{\circ}C$), diferença esta ficando abaixo de 3%. Não ocorreram diferenças significativas entre valores antes e após o condicionamento. Um fato importante observado na análise dos resultados está na seguinte constatação:

A mistura com ligante convencional e incorporação de cal calcítica, aqui analisada com uma mistura com ligante modificado e sem incorporação de cal, apresenta valores médios de RT retido e MR retido da ordem de 12% maiores, demonstrando assim uma maior capacidade desta mistura de manter as propriedades da mistura com o acréscimo de temperatura.

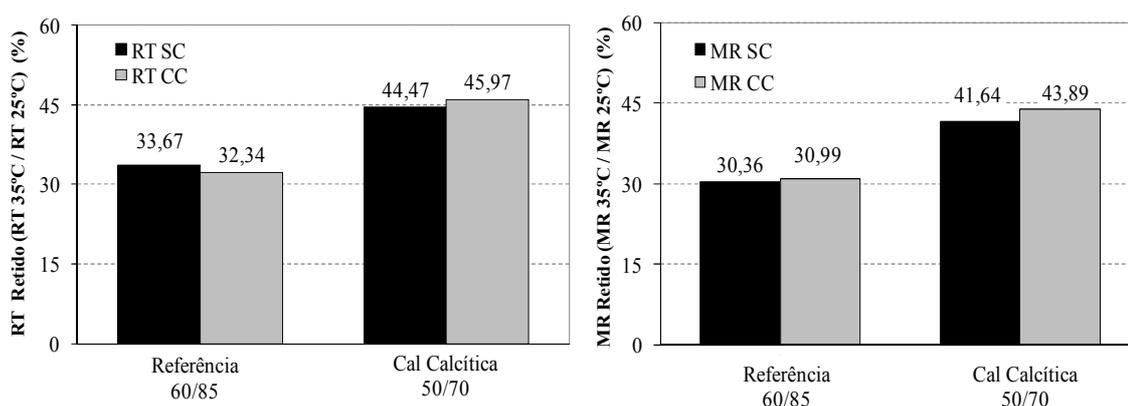


Figura 39: Resistência à tração e módulo de resiliência retido em função da temperatura de ensaio com e sem condicionamento das amostras (%)

De forma geral, após a análise deste conjunto de dados observa-se uma tendência de fragilização das amostras com ligante modificado (aumento de rigidez e queda de resistência) com o processo de condicionamento ao qual foram submetidas.

Por outro lado, as misturas com incorporação de cal apresentaram um aumento significativo de rigidez, porém acompanhado de um aumento de resistência para evitar essa tendência à fragilização que ocorreu nas misturas anteriormente analisadas.

Na prática, isso representa uma mistura mais resistente à diversos mecanismos de degradação, e se for aplicável às misturas desta pesquisa a experiência internacional, que relata o fato de as misturas com incorporação de cal se tornarem mais rígidas, porém menos suscetíveis ao trincamento devido a ação da cal, fato este que não foi possível analisar nesta pesquisa, estas misturas com incorporação de cal calcítica podem ser consideradas como sendo misturas de alto desempenho e durabilidade, conforme objetivo desta pesquisa.

Abre-se possivelmente uma nova alternativa na busca por pavimentos com melhor desempenho e durabilidade: modificar a mistura através da incorporação de cal hidratada de boa qualidade ao invés de modificar o ligante asfáltico. Nesta mudança de processo tem-se alguns fatores benéficos adicionais, tais como temperaturas mais baixas de usinagem proporcionadas pelo ligante convencional, economia de energia na usinagem e na energia utilizada na modificação do ligante, além disso pode-se dispor de revestimentos mais resistentes à degradação (\uparrow MR; \uparrow RT; \uparrow MR e RT retido a temperaturas mais elevadas).

4.2.4 Avaliação das Deformações Permanentes através de Creep Dinâmico

A configuração do carregamento aplicado nas amostras foi realizada com o objetivo de gerar pressões iguais a 0,56 MPa (80 PSI) (pressão de inflação dos pneus de um eixo padrão), com frequência de 1 Hz. Porém, em função de problemas/limitações no software e no sistema de aplicação do carregamento, a tensão real aplicada foi ligeiramente superior àquela proposta, ficando em cerca de 0,70 MPa (100 PSI). Apesar deste aumento na tensão aplicada, a análise proposta não foi afetada, pois este aumento ocorreu em todos os ensaios realizados, sendo todas as amostras submetidas ao mesmo carregamento, sendo perfeitamente comparáveis os resultados obtidos.

Na Figura 40 é representado o esquema padrão de deslocamentos obtidos durante a realização dos ensaios de creep dinâmico com o período total de ensaio. Na Figura 41 é representado somente o período de carregamento (3600 ciclos) mais o período de recuperação (900 segundos), desconsiderando o condicionamento inicial.

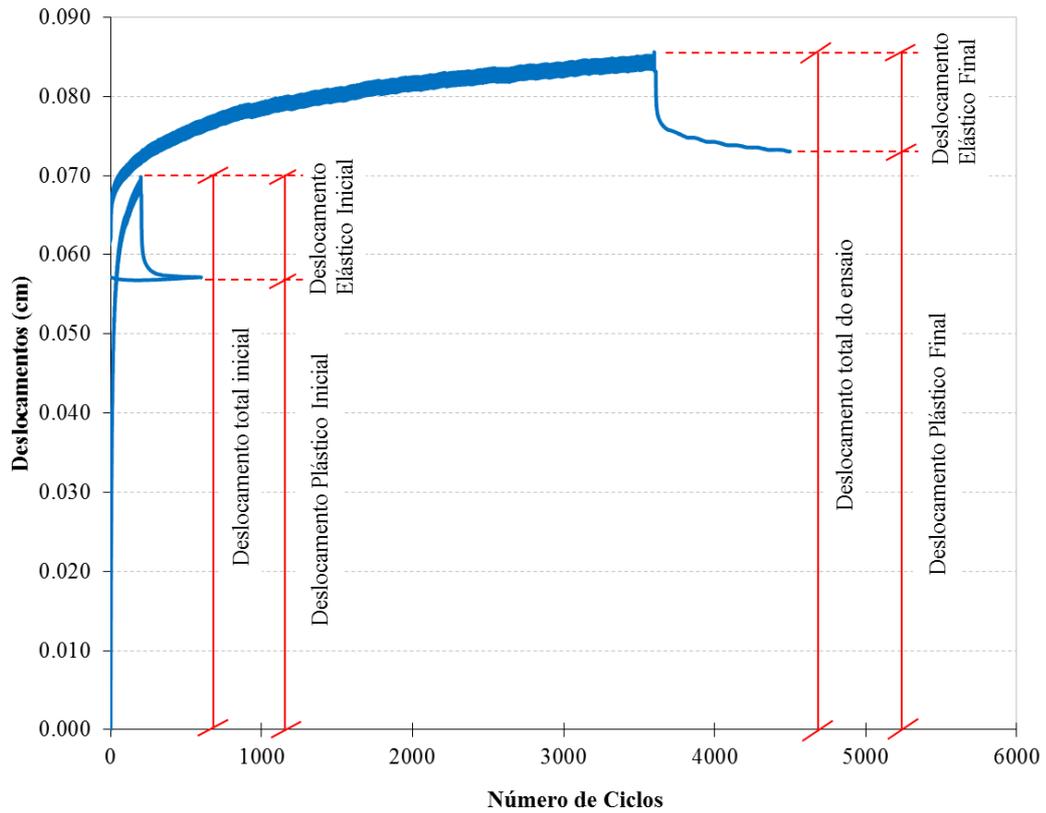


Figura 40: Esquema padrão de deslocamentos obtidos durante ensaios de Creep Dinâmico (período de condicionamento: 200 ciclos de carregamento + 400 segundos de recuperação e período de ensaio: 3600 ciclos de carregamento + 900 segundos de recuperação) (cm)

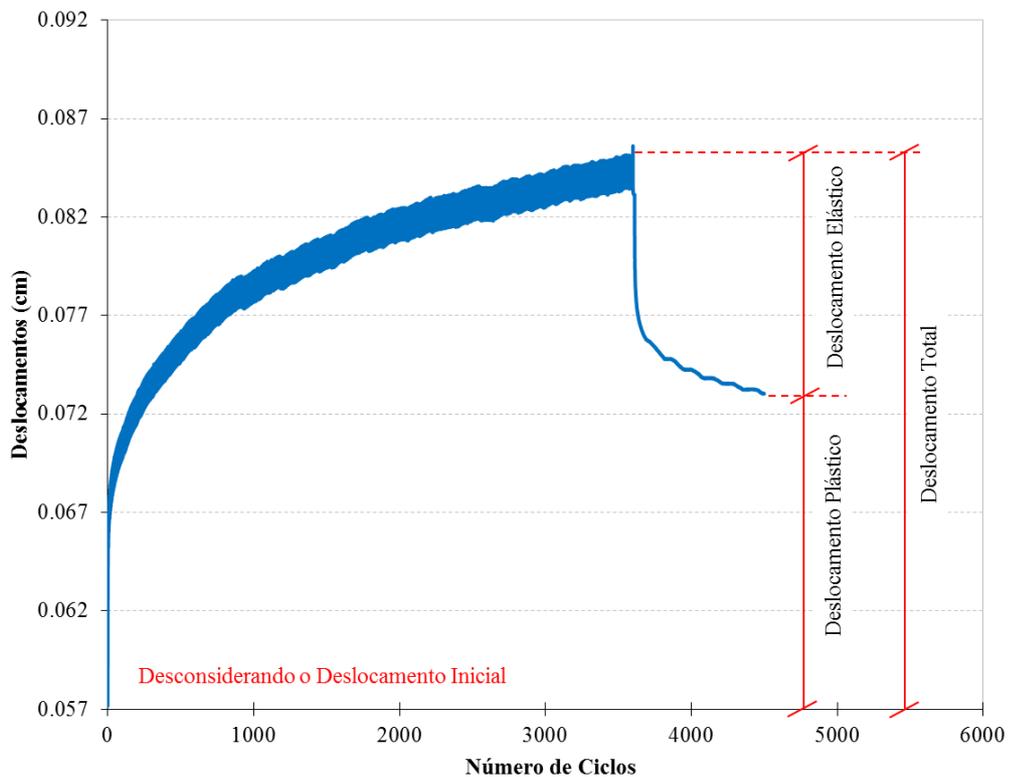


Figura 41: Esquema padrão de deslocamentos obtidos durante ensaios de Creep Dinâmico (período de ensaio: 3600 ciclos carregamento + 900 segundos recuperação) (cm)

4.2.4.1 Determinação dos deslocamentos e deformações

Os valores dos deslocamentos obtidos no ensaio estão representados na Figura 42, e consistem em valores médios obtidos a partir de duas amostras ensaiadas para cada mistura estudada nesta pesquisa.

Com uma forma ainda bastante genérica de análise, pode se destacar alguns aspectos como: distinção entre misturas com ligante convencional e ligante modificado, onde as misturas com ligante modificado apresentam uma maior resistência à deformação; a incorporação de cal nas misturas aumenta a resistência à deformação das misturas, sendo essa variação mais pronunciada em misturas com ligante convencional; incorporação de cal calcítica proporciona uma maior resistência à deformação do que misturas com cal dolomítica, quando analisadas para o mesmo tipo de ligante utilizado.

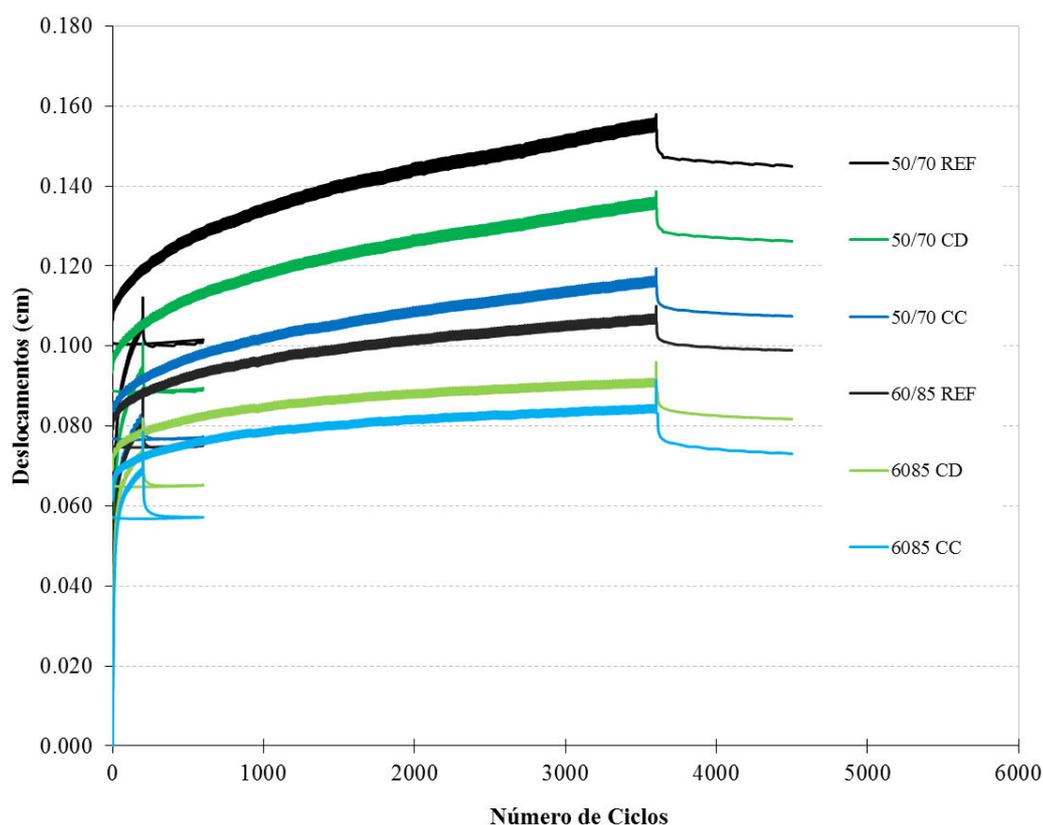


Figura 42: Deslocamentos obtidos para as misturas ensaiadas

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

Permanentes e Recuperáveis. A seguir na Figura 43 são apresentadas detalhadamente diversas etapas dos resultados de deslocamentos durante o ensaio de *creep* dinâmico.

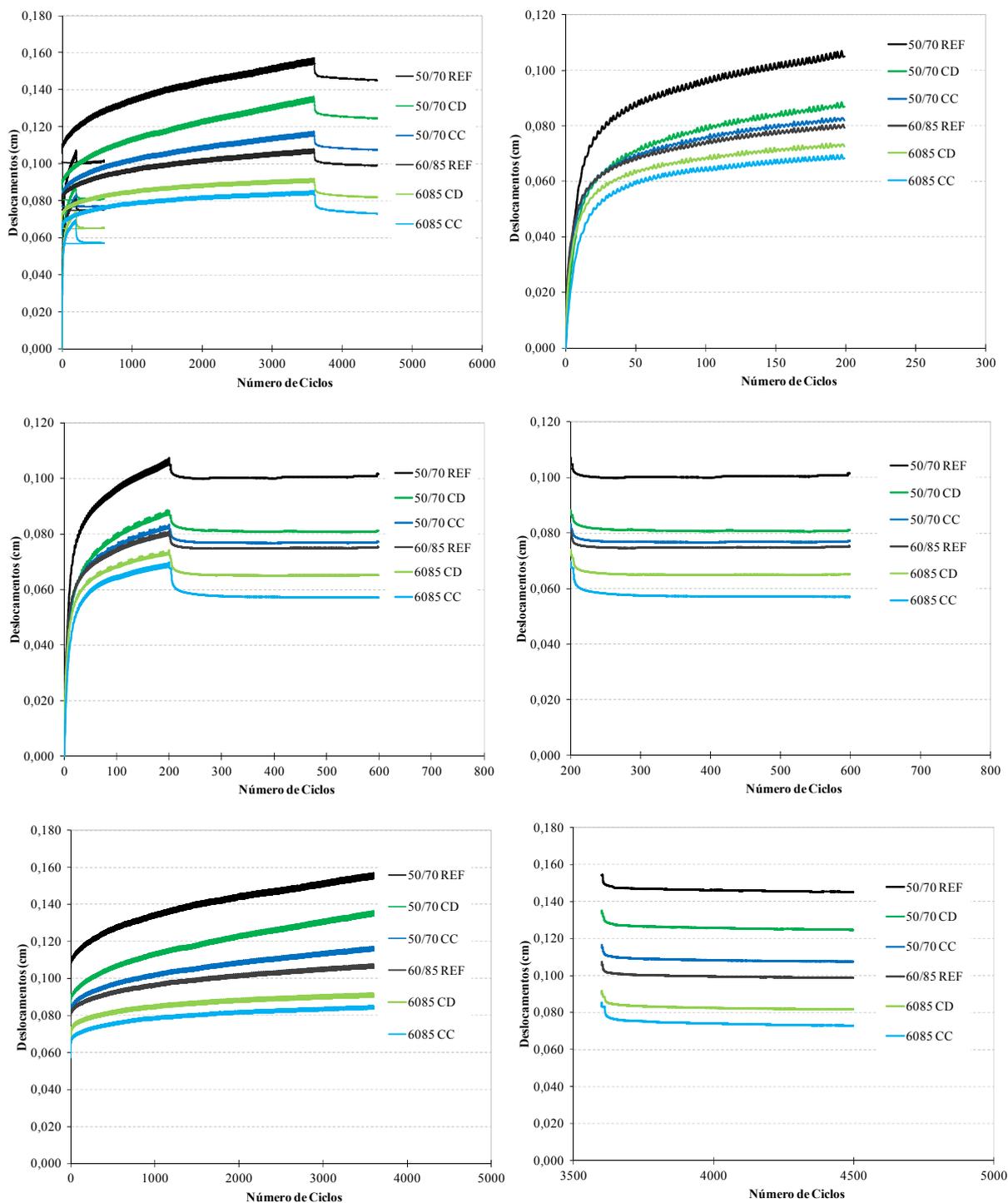


Figura 43: Deslocamentos obtidos para as misturas ensaiadas separadas em etapas importantes
a) período total de ensaio; b) período inicial de condicionamento (200 ciclos de carga);
c) período de condicionamento (200 ciclos de carga + 400 segundos de recuperação);
d) recuperação inicial (400 segundos); e) período de ensaio (3600 ciclos de carga);
f) período final de recuperação (900 segundos)

4.2.4.2 Deformações totais

As deformações totais correspondem às deformações ocorridas no período inicial de condicionamento onde são aplicados 200 ciclos de cargas, para acomodação do sistema e amostra (Inicial), e as deformações ocorridas no ensaio propriamente dito, período de 3600 ciclos de carregamento (Ensaio).

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

Os valores das deformações obtidas para as misturas com ligante convencional e ligante modificado, com e sem incorporação de cal hidratada são apresentados na Figura 44 abaixo.

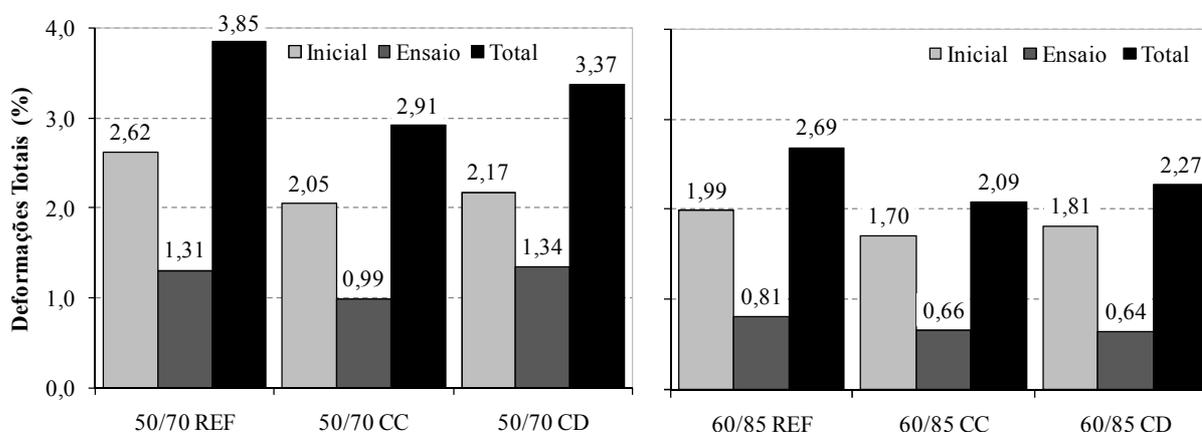


Figura 44: Deformações totais para misturas com ligante convencional (CAP 50/70) e misturas com ligante modificado (CAP 60/85-E) sem incorporação de cal (REF) e com incorporação de cal calcítica (CC) e cal dolomítica (CD) (%)

A partir dos resultados apresentados, pode-se verificar que misturas com incorporação de cal, tanto calcítica quanto dolomítica apresentaram menores valores totais de deformação. Considerando as deformações iniciais e as deformações de ensaio este comportamento se mantém, com exceção da mistura com cal dolomítica e ligante convencional que apresentou uma deformação de ensaio maior (1,34%) do que a deformação da amostra de referência (1,31%).

A presença e o tipo de cal nas misturas também influenciam as deformações. A presença de cal, quando de boa qualidade, foi capaz de reduzir em até 0,94% o valor das deformações em amostras com ligante convencional e em 0,60% para amostras com ligante modificado, para presença de cal de menor qualidade estes valores caem pela metade. Novamente a efetividade da cal foi mais significativa em misturas com ligante convencional, como já foi visto anteriormente em outras propriedades analisadas.

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

As deformações totais apresentadas pelas amostras ensaiadas serão divididas em duas parcelas, deformações permanentes e deformações recuperáveis, e serão analisadas separadamente nos itens a seguir.

4.2.4.3 Deformações permanentes

Os valores das deformações permanentes sofridas no período inicial, durante o ensaio e as deformações permanentes totais estão apresentados na Figura 45. As deformações sofridas pelas amostras no período inicial de condicionamento para acomodação da amostra e do sistema foram maiores do que as deformações sofridas durante o ensaio propriamente dito (3600 ciclos).

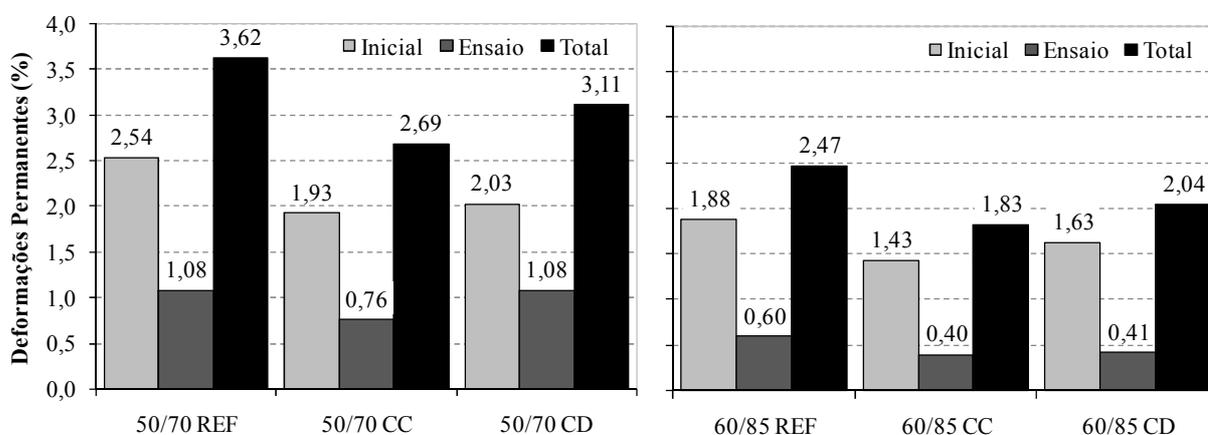


Figura 45: Deformações permanentes para misturas com ligante convencional (CAP 50/70) e misturas com ligante modificado (CAP 60/85-E) sem incorporação de cal (REF) e com incorporação de cal calcítica (CC) e cal dolomítica (CD) (%)

Em misturas com ligante convencional cerca de 70% das deformações permanentes ocorrem no período de condicionamento (200 primeiros ciclos), somente para a mistura com cal dolomítica este valor foi ligeiramente inferior (65%).

Para misturas com ligante modificado este percentual sobe para praticamente 76% na mistura de referência, tendendo a uma elevação em misturas com cal chegando a praticamente 80% quando é incorporada cal dolomítica.

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

Os resultados apresentados evidenciam que a incorporação de cal aumentou a resistência à deformação permanente das misturas asfálticas, tornando-as menos deformáveis. Tanto misturas com ligante convencional quanto misturas com ligante modificado (sem cal) acumularam deformações permanentes em torno de 25,7% maiores às registradas em amostras com cal hidratada calcítica. Quando se analisa estes valores em misturas com cal dolomítica ficam próximos a 14% e 17% para misturas com ligante convencional e modificado, respectivamente.

4.2.4.4 Deformações recuperáveis

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

Na Figura 46 são apresentados os valores de recuperação das deformações sofridas pelas amostras em função da distância analisada na amostra (4 cm) conforme realizado anteriormente para as deformações totais e permanentes. Valores de recuperação bastante semelhantes são observados, por exemplo, em misturas com ligante convencional (REF, CC e CD), porém, as amostras sofreram deformações totais diferentes, em função disso são apresentados posteriormente os valores percentuais de deformações recuperáveis em função do deslocamento/deformação sofrido em cada etapa do ensaio, ou seja, etapa inicial de condicionamento (200 ciclos de carga + 400 ciclos de recuperação) e posteriormente durante o ensaio (3600 ciclos +900 ciclos de recuperação).

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

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

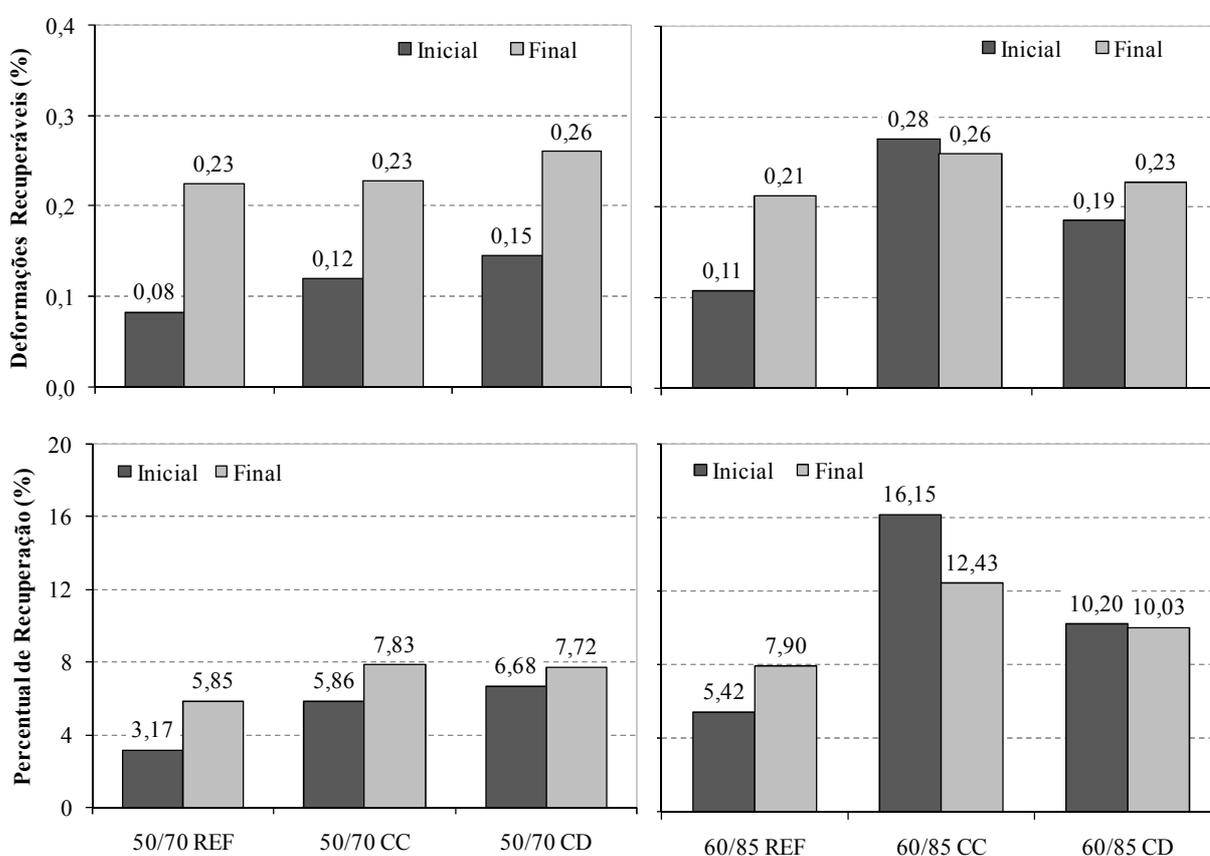


Figura 46: Deformações recuperáveis e percentual de recuperação para misturas com ligante convencional (CAP 50/70) e misturas com ligante modificado (CAP 60/85-E) sem incorporação de cal (REF) e com incorporação de cal calcítica (CC) e cal dolomítica (CD)

O percentual de recuperação “Final” apresentado anteriormente é obtido ao considerar toda a deformação sofrida pela amostra até os 900 ciclos de recuperação, incluindo a parcela de deformação permanente sofrida no período de condicionamento da amostra (200 ciclos de carga e 400 ciclos de repouso).

Quando se desconsidera o período de condicionamento e passa-se a considerar somente as deformações provocadas durante os 3600 ciclos de carregamento, os valores do percentual de recuperação são mais elevados, conforme apresentado na Figura 47.

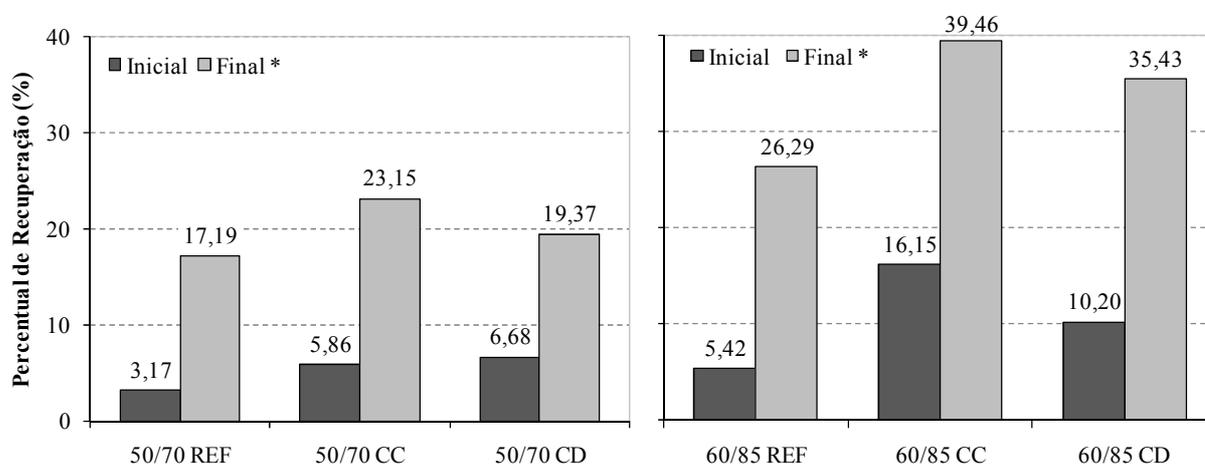


Figura 47: Percentual de recuperação para misturas com ligante convencional (CAP 50/70) e misturas com ligante modificado (CAP 60/85-E) sem incorporação de cal (REF) e com incorporação de cal calcítica (CC) e cal dolomítica (CD) (%)

Ao considerar misturas com o mesmo tipo de ligante os maiores percentuais de recuperação ocorrem para misturas com incorporação de cal, sendo ligeiramente mais elevados para misturas com cal calcítica (5,96% contra 2,18% para cal dolomítica) para misturas com ligante convencional.

Recuperações maiores ocorreram em misturas com ligante modificado quando comparadas com recuperações com ligante convencional. Neste caso os maiores valores de recuperação elástica também foram obtidos com cal calcítica (13,17% contra 9,14% para cal dolomítica) em relação às misturas de referência (sem cal).

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

4.3 APLICAÇÃO DA METODOLOGIA UCL® PARA VERIFICAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA CAL HIDRATADA NAS MISTURAS ASFÁLTICAS

Conforme descrito na metodologia, este procedimento de ensaio tem por objetivo caracterizar o poder de coesão dado por uma determinada quantidade de ligante a uma mistura padrão de agregados.

Nesta pesquisa será analisada a influência tanto do tipo de ligante (convencional e modificado por polímeros) quanto do tipo de filler (cal calcítica e cal dolomítica) nas propriedades fundamentais das misturas asfálticas, ou seja, coesão, suscetibilidade térmica, adesividade ligante-agregado, envelhecimento e características do mástique filler-betume. As características das misturas e quantidade de filler incorporado estão apresentadas na Tabela 18.

Tabela 18: Principais características das misturas Metodologia UCL

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

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

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

Mediante a determinação das curvas de estado (perdas em função da temperatura) estamos avaliando a coesão das misturas em diferentes temperaturas e, conseqüentemente, a susceptibilidade térmica deste ligante, pode-se dessa forma comparar seu comportamento, diferenciando o comportamento de ligantes convencionais e modificados, além da influência do tipo de filler empregado na formação do mástique.

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

Analisando as curvas de estado das misturas formuladas nesta pesquisa observam-se perdas de massa mais acentuadas em temperaturas mais baixas (5°C) em função da manifestação de um comportamento frágil do ligante asfáltico (Figura 48 a). Em temperatura ambiente (25°C) as perdas são menores em função do comportamento elastoplástico (Figura 48 b), já em temperaturas mais elevadas (a partir de 45°C) as misturas começam a apresentar novamente um incremento das perdas devido à inconsistência (Figura 48 c).

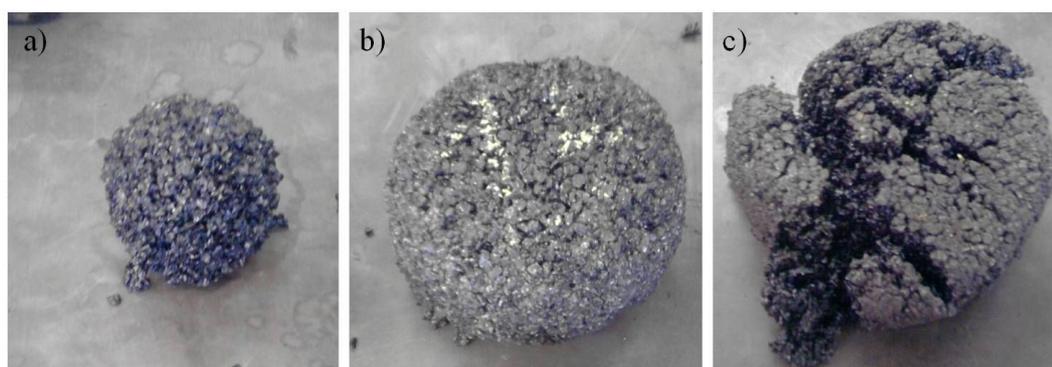


Figura 48: Comportamento do ligante asfáltico em função da temperatura
a) frágil; b) elastoplástico; c) inconsistente.

4.3.1 Curvas de estado – verificação de coesão e suscetibilidade térmica

Nos gráficos da Figura 49 são apresentadas primeiramente as curvas de estado das misturas com ligante convencional e incorporação de cal (50/70 REF, 50/70 + CC e 50/70 + CD), em seguida são apresentadas as curvas de estado das misturas com ligante modificado por polímero e incorporação de cal (60/85 REF, 60/85 + CC e 60/85 + CD) e finalmente um comparativo entre todas as curvas de estado geradas nesta pesquisa.

Algumas diferenças significativas podem ser observadas entre as misturas, a seguir serão analisados separadamente alguns fatores que promovem este comportamento tais como: tipo de ligante asfáltico empregado na mistura (ligante convencional ou ligante modificado por polímeros) e também o tipo de filer incorporado à mistura padrão de agregados (cal calcítica ou cal dolomítica) para a formação de um mástique asfáltico para auxiliar no ganho de coesão das misturas.

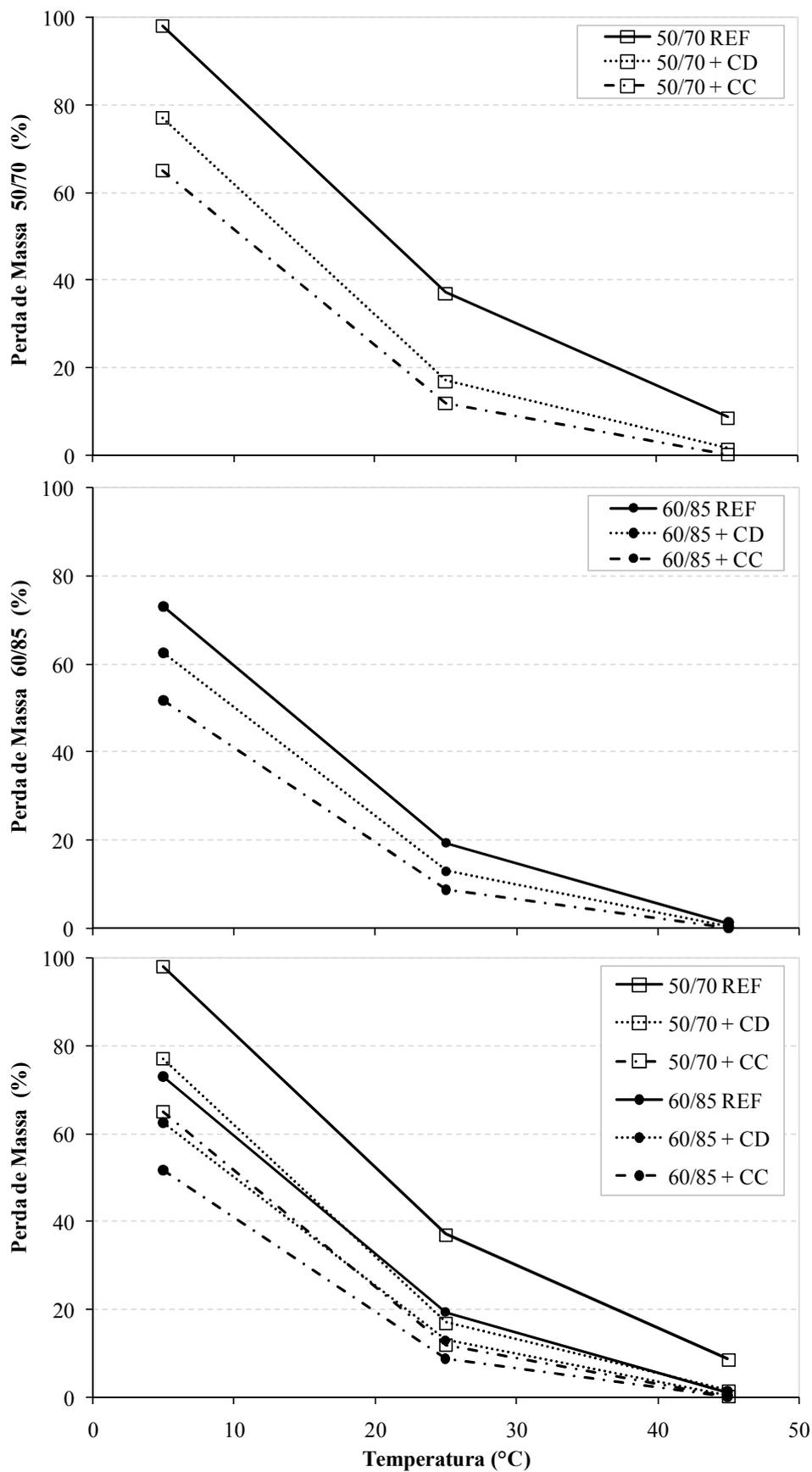


Figura 49: Curvas de estado das misturas com CAP 50/70 e CAP 60/85-E (%)

Na Figura 50 é apresentado um detalhe das curvas de estado de todas as misturas aqui analisadas, na legenda encontram-se as misturas ordenadas da maior perda de massa para a menor perda de massa.

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

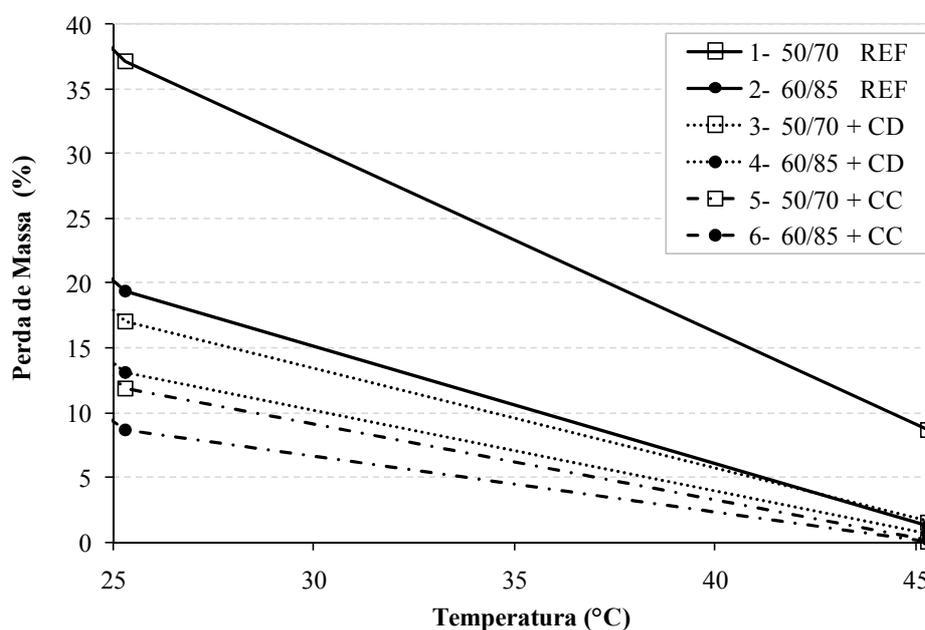


Figura 50: Detalhe das curvas de estado, perda de massa em função da temperatura de condicionamento das amostras (maior → menor perda de massa) (%)

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

As diferenças de perda de massa proporcionadas pelo tipo de ligante nas misturas sem cal e com incorporação de cal estão apresentadas na Figura 51, onde se representa a diferença percentual na qual as misturas com ligante modificado são melhores em termos de resistência ao desgaste quando comparadas às misturas com ligante convencional.

Em temperaturas mais baixas (5°C), há um maior “distanciamento” entre o comportamento das misturas com ligante modificado e convencional (24,94%), demonstrando uma maior fragilidade do ligante convencional nestas condições, principalmente quando não há incorporação de cal (Referência). Em temperatura de ensaio de 25°C os comportamentos tendem a se aproximar, caindo esta diferença para 17,72%. Já a 45°C a diferença de perda de massa entre as duas misturas causada pelo tipo de ligante cai para um valor próximo a 7%.

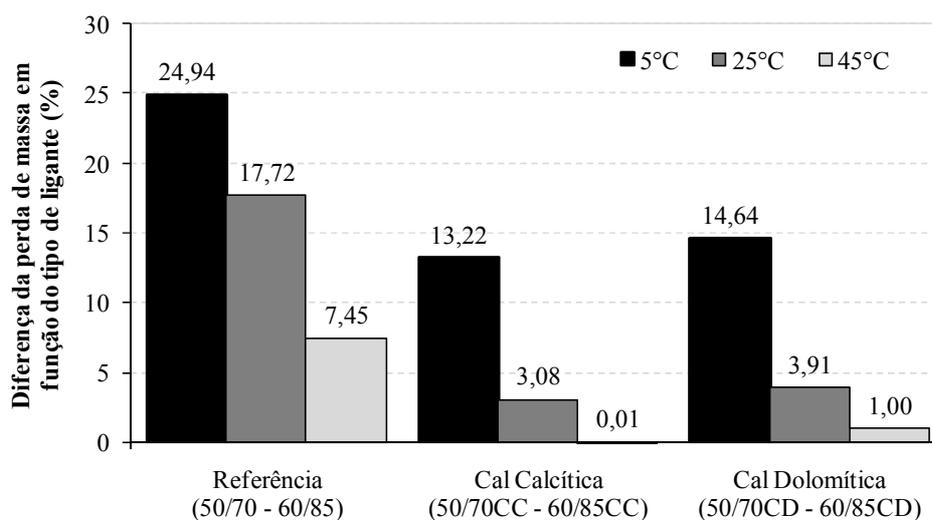


Figura 51: Diferença da perda de massa em função do tipo de ligante asfáltico utilizado (diferença percentual na qual as misturas com ligante modificado se sobressaem sobre as misturas com ligante convencional em termos de resistência ao desgaste) (%)

A partir do momento que se introduz mais uma variável no sistema, ou seja, faz-se a incorporação de cal nas misturas, a diferença provocada pelo tipo de ligante que era de praticamente 25% (Referência) cai para valores próximos a 14% na temperatura de 5°C, valores entre 3% e 4% para temperatura de 25°C e entre 0 e 1% para temperaturas de 45°C.

A queda deste valor significa uma “aproximação” dos comportamentos (percentual de perda de massa) de misturas com ligante modificado e convencional, isto pode estar acontecendo pelo seguinte motivo: uma melhoria mais acentuada nas misturas com ligante convencional em relação às misturas com ligante modificado devido à incorporação de cal. Estes fatos serão esclarecidos mais adiante através da análise da influência provocada pela incorporação da cal hidratada nas misturas.

Como visto anteriormente, quando foi incorporada cal nas misturas com ligante modificado ocorreram quedas consideráveis de resistência, quedas estas causadas provavelmente por interações químicas entre a cal (principalmente calcítica) e os produtos modificadores do

ligante. Estes mesmos fatos podem estar relacionados com esta “aproximação” de comportamento referentes à perda de massa das misturas.

Ao comparar as misturas com incorporação de cal observamos que em misturas com cal dolomítica os valores são ligeiramente maiores, o que nos remete à ideia de comportamentos mais próximos (entre ligantes diferentes) nas misturas com cal calcítica, ou seja, nestas misturas os resultados são melhores para o ligante convencional.

Ao analisar separadamente a ação da cal nas misturas em função do tipo de ligante, a mesma se mostrou mais efetiva nas misturas com ligante convencional, os valores globais desta influência são apresentados na Figura 52. Estes valores representam o percentual de melhoria da coesão das misturas, ou seja, o percentual de diminuição da perda de massa em relação à mistura sem filer para cada um dos tipos de ligante: a) ligante convencional e b) ligante modificado.

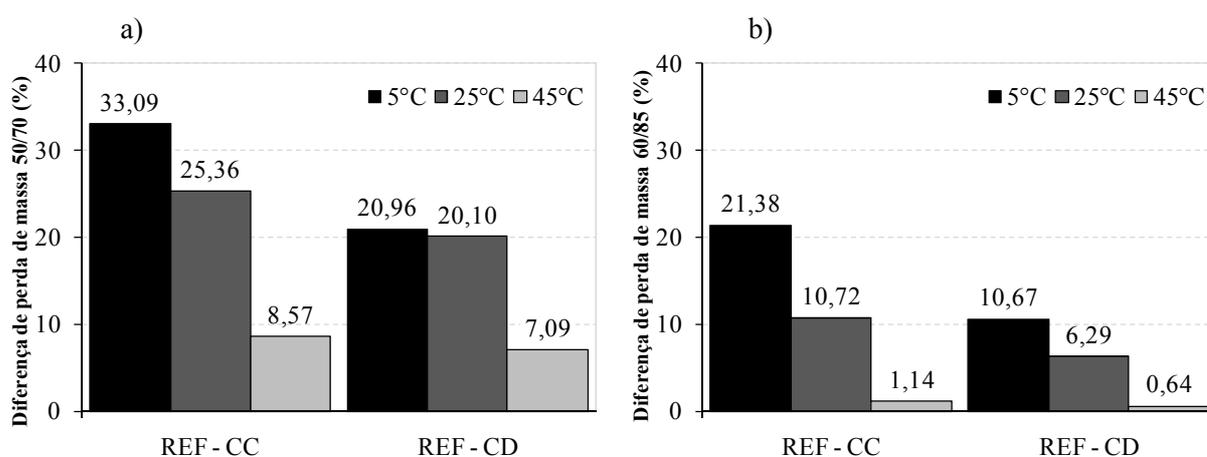


Figura 52: Melhoria de coesão das misturas representada pelo percentual de diminuição da perda de massa em relação à mistura sem filer; a) misturas com ligante convencional; b) misturas com ligante modificado CAP 60/85-E (%)

Com a incorporação de cal calcítica obtiveram-se os melhores resultados, com melhorias de até 33% para temperaturas baixas (5°C), para a temperatura ambiente de 25°C esses valores ficaram próximos a 25% caindo para cerca de 8% em temperaturas mais elevadas de ensaio (45°C). Com incorporação de cal dolomítica estes valores foram inferiores, sendo também inferiores quando realizada a incorporação em misturas com ligantes modificados.

Em resposta ao questionamento levantado anteriormente, os resultados apresentados na Figura 52 demonstram que a “aproximação” do comportamento entre misturas com ligante modificado e misturas com ligante convencional quando nas mesmas é incorporada cal hidratada se deve realmente a uma melhoria mais significativa nas misturas com ligante convencional, conforme hipótese sugerida (Figura 52 a).

Como observado nos gráficos anteriores, o percentual de melhoria proporcionado pela ação da cal foi mais acentuado nas misturas com ligante convencional (CAP 50/70) para ambos os tipos de cal empregados nas misturas (calcítica e dolomítica). A magnitude dessa variação está representada no gráfico da Figura 53 a, sendo muito semelhante para os dois tipos de cal, porém misturas com cal calcítica apresentaram uma superioridade de aproximadamente 1%.

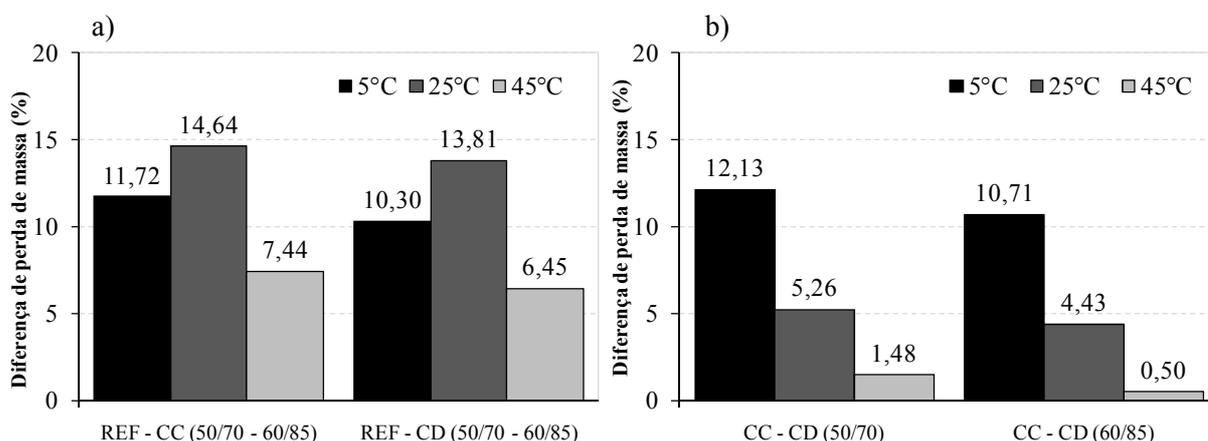


Figura 53: Diferença do percentual de melhoria da coesão das misturas a) entre os tipos de ligante; b) entre os tipos de cal

Na Figura 53 b são apresentadas as variações que ocorrem em função do tipo de cal incorporada nas misturas, conforme visto nos gráficos da Figura 52, a incorporação de cal calcítica mostrou-se mais efetiva nos dois tipos de ligante. Essa diferença é apresentada na Figura 53 b. Diferenças médias próximas de 12% são obtidas para temperaturas mais baixas de ensaio, em temperatura ambiente estes valores são de cerca de 5%, caindo para valores próximos a 1,5% para temperaturas de ensaio de 45°C. Para misturas com ligantes modificados estes valores apresentam uma pequena diferença, porém não muito significativa, com variações próximas a 1%.

Um fato interessante observado está na melhoria mais acentuada que se observa em temperaturas mais baixas de ensaio (5°C), isso demonstra que as misturas sem cal apresentam um comportamento mais frágil e ao se incorporar cal essa fragilidade é reduzida, gerando um percentual de melhoria mais acentuado nesta situação.

A cal é conhecida por ser um filer ativo que manifesta suas propriedades multifuncionais em temperaturas mais elevadas, como visto nos ensaios anteriormente descritos, em que é capaz de manter melhor as características de rigidez e resistência das misturas quando estas são analisadas comparativamente com misturas sem incorporação de cal e a temperaturas mais elevadas de ensaio, comportando-se como filer inerte a temperaturas mais baixas. Neste caso, porém, a cal mostrou grande influência nas propriedades de coesão das misturas em temperaturas baixas.

A explicação deste fato pode estar na ação da cal simplesmente como filer incorporado para formação de mástique, aumentando o poder coesivo da mistura, não atuando como filer ativo.

Outra observação importante realizada nesta metodologia está no comportamento de misturas com ligante convencional quando nas mesmas é realizada a incorporação de cal. Conforme já havia sido observado nos ensaios de módulo de resiliência e resistência à tração, nos resultados obtidos na metodologia UCL através das curvas de estado comprovou-se o mesmo tipo de comportamento, em que misturas com ligante convencional inicialmente apresentavam desempenho inferior (maior perda de massa) em relação às misturas com ligante modificado por polímeros, conforme já era esperado devido às características do ligante modificado.

Porém, quando foi incorporada uma quantidade de cal hidratada nas misturas com ligante convencional elas passaram a apresentar um desempenho idêntico e até mesmo superior em relação às misturas com ligante modificado. Este fato pode ser observado nas curvas de estado da Figura 54, onde a simples incorporação de cal hidratada dolomítica proporcionou à mistura um comportamento idêntico em relação às misturas com ligante modificado em termos de resistência ao desgaste.

Quando a cal incorporada passa a ser de melhor qualidade, no caso aqui de uma cal calcítica, o desempenho das misturas com ligante convencional passa a ser significativamente melhor em relação às misturas com ligante modificado (sem incorporação de cal).

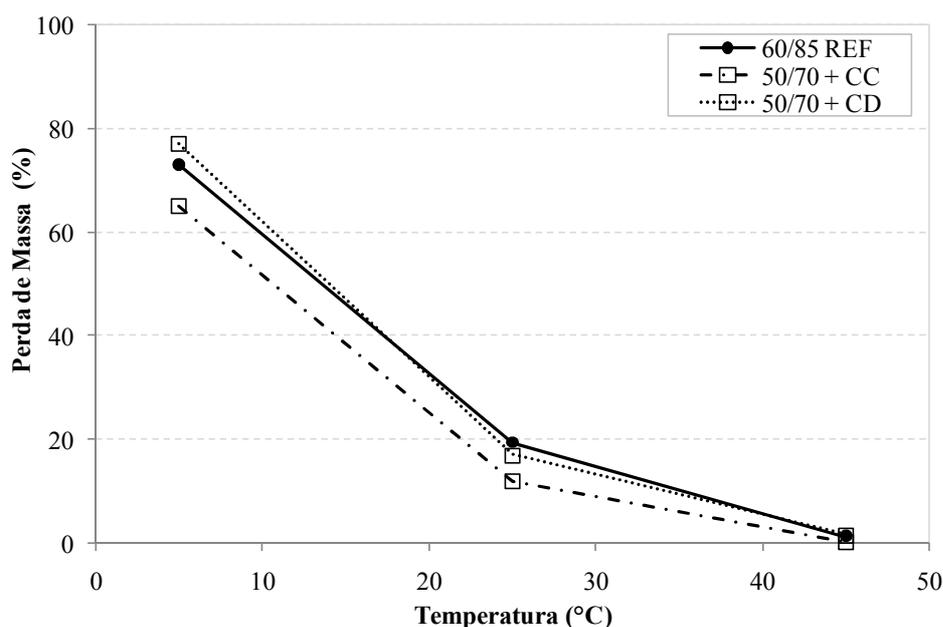


Figura 54: Comparativo entre curvas de estado de amostras preparadas com ligante modificado com polímeros (60/85 REF) e misturas com ligante convencional com incorporação de cal (50/70 + CC e 50/70 + CD)

Estes resultados, e os demais já apresentados nesta pesquisa demonstram a importância da incorporação de cal na melhoria das propriedades das misturas asfálticas, principalmente nas misturas com ligante convencional, que passam a apresentar comportamento semelhante e até mesmo superior a misturas com ligante modificado.

4.3.2 Adesividade ligante agregado

Pela ação deletéria da água, o ligante se separa do agregado e diminui a coesão da mistura. Portanto, avaliando a coesão depois de submeter a mistura a ação da água podemos verificar a adesividade do ligante no agregado. O procedimento realizado a seguir é parte integrante da metodologia UCL® e tem por objetivo determinar a perda de massa antes e após processo de condicionamento por imersão das amostras.

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

Na Figura 55 são apresentados os resultados antes e após imersão de misturas preparadas com ligante convencional. Tanto as misturas de referência, quanto as misturas com incorporação de cal tiveram perda total depois do processo de condicionamento por imersão.

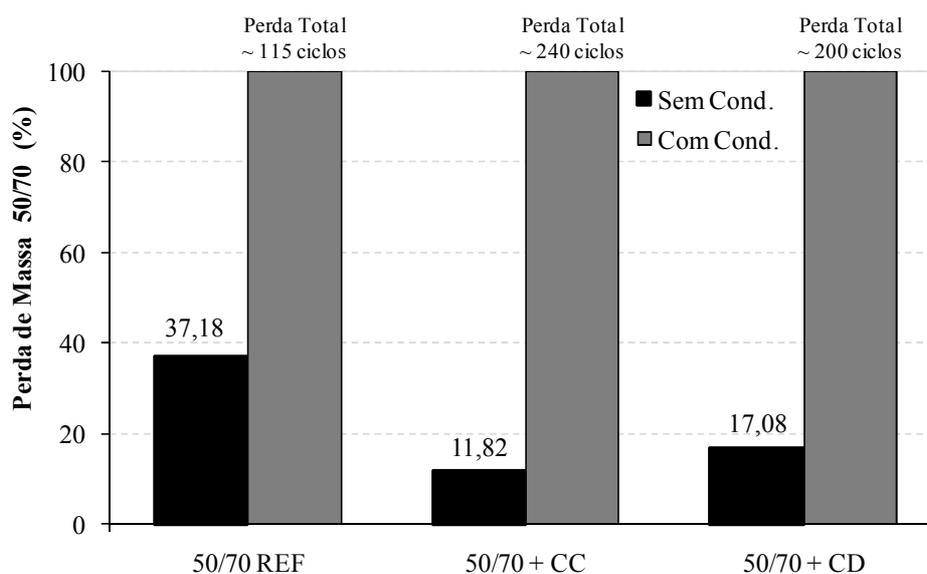


Figura 55: Perda de massa com condicionamento e sem condicionamento das amostras de misturas com CAP 50/70 e incorporação de cal (%)

Percebeu-se que durante o processo de condicionamento as amostras com ligante convencional começavam a perder totalmente a sua coesão, não resistindo as 24 horas sem se desmanchar completamente. Como alternativa para solução deste fato procedeu-se com um processo de confinamento da amostra.

Esse confinamento foi realizado envolvendo a lateral da amostra com fita adesiva antes do processo de condicionamento, obteve-se um resultado positivo com essa técnica, as amostras permaneceram intactas para a realização do ensaio, porém durante o ensaio na máquina de abrasão, a perda de massa das amostras foi total, nenhuma amostra resistiu.

Para as amostras com incorporação de cal, não foi necessário o procedimento para confinamento das amostras, as mesmas foram capazes de resistir à imersão sem desmanchar, porém também apresentaram perda total durante a realização do ensaio de abrasão.

Apesar das amostras, tanto de referência quanto as com incorporação de cal apresentar perda total, pôde-se notar diferenças na sua resistência ao desgaste durante a realização dos ensaios. Observou-se em qual ciclo aproximadamente ocorreu a desintegração total da amostra, estes valores corresponderam a 115 ciclos para misturas de Referência (sem incorporação de cal), 240 ciclos para misturas com cal calcítica e 200 ciclos para cal dolomítica.

A incorporação de cal não foi capaz de proporcionar uma coesão necessária para evitar a perda total da amostra, mas como foi possível notar pelo número de ciclos proporcionou alguma melhoria, sendo esta maior para misturas com cal calcítica.

Uma possível explicação em relação ao fato das amostras não resistirem à imersão diz respeito ao ponto de amolecimento (PA) do ligante (CAP 50/70) que é de 46,75°C. A imersão a 60°C (mais de 13°C acima do PA) acabou desestabilizando as amostras, como o princípio da metodologia está em promover a ligação entre as partículas simplesmente por uma película de ligante e como as misturas apresentam um elevado volume de vazios devido a granulometria aberta, não havia coesão suficiente para manter a estabilidade da mistura, ao incorporar um fíler (cal hidratada) uma maior coesão foi proporcionada evitando que as amostras sofressem uma total desestabilização durante o período de imersão.

Nas misturas com ligante modificado (CAP 60/85-E) as amostras não sofreram desestabilização durante o condicionamento e resistiram aos 300 ciclos do ensaio. Os resultados das perdas de massa sem condicionamento, com condicionamento e a perda por imersão (que representa a diferença entre a perda de massa antes e após o condicionamento por imersão) são apresentados na Figura 56.

Para misturas de referência (sem incorporação de cal) a perda devido ao processo de condicionamento por imersão foi de 32,12%, quando realizou-se a incorporação de cal estes valores caíram para 20% em misturas com cal calcítica e 26,71% para misturas com cal dolomítica.

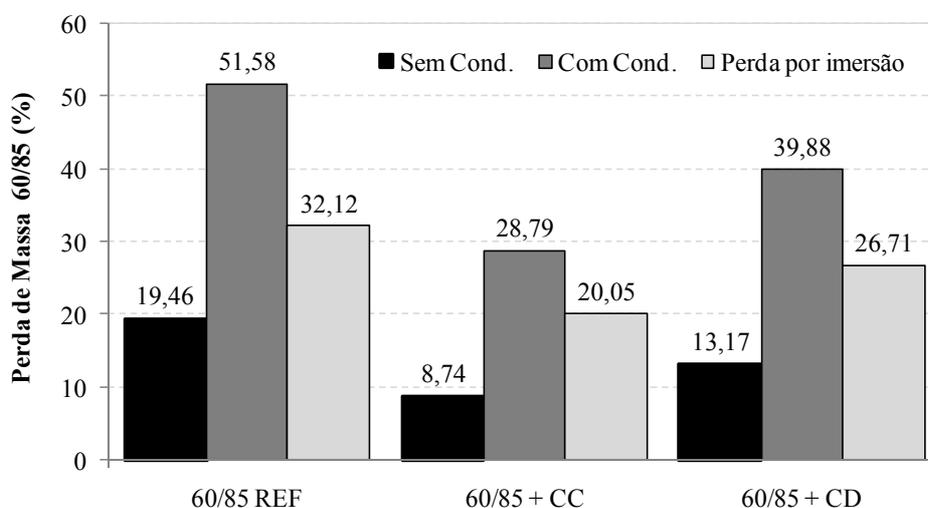


Figura 56: Perda de massa com condicionamento e sem condicionamento das amostras de misturas com CAP 60/85-E e incorporação de cal (%)

Em misturas com cal calcítica a perda de massa foi a menor das três misturas analisadas, 8,74% em misturas que não passaram pelo processo de condicionamento por imersão e 28,78% ao passar pelo processo de imersão, resultando em uma perda por imersão de 20,05%.

Neste procedimento demonstrou-se a influência tanto da presença de mástique quanto do tipo de cal empregada em sua formulação para misturas asfálticas com ligante convencional e modificado. Em relação à melhoria de coesão e suscetibilidade térmica das misturas percentuais maiores foram observados em misturas com ligante convencional e incorporação de cal calcítica.

Apesar de apresentar um bom desempenho na melhoria da coesão, conforme visto nas curvas de estado, as misturas com ligante convencional não resistiram ao processo de condicionamento por imersão a 60°C, este fato pode estar relacionado com a temperatura de imersão acima do PA em misturas em que a coesão é proporcionada simplesmente por uma película de ligante entre os agregados (graduação aberta com 29% de volume de vazios).

4.4 INCORPORAÇÃO DE CAL HIDRATADA NO LIGANTE ASFÁLTICO: AVALIAÇÃO DO ENVELHECIMENTO ATRAVÉS DE ENSAIO RTFOT

Além dos ensaios realizados em misturas asfálticas para avaliar a influência da incorporação da cal hidratada em suas propriedades, também foram realizados ensaios para avaliar a influência da incorporação de cal hidratada diretamente nos ligantes asfálticos e como esta incorporação afeta as propriedades dos ligantes, antes e após processo de envelhecimento.

A seguir serão apresentados os resultados dos ensaios de ponto de amolecimento (PA), penetração (PN), valores de penetração retida, densidade, variação de massa e densidade de amostras com ligante puro (convencional e modificado) e com incorporação de cal hidratada (calcítica e dolomítica) antes e após processo de envelhecimento em estufa RTFOT por um período de 85 minutos a 163°C conforme especificação (efeito do calor e do ar).

Adicionalmente foram realizados os mesmos ensaios para um tempo de envelhecimento de 120 minutos para verificar a influência do tempo de envelhecimento nas amostras.

O objetivo desta série de ensaios de caracterização é verificar a conformidade do material asfáltico com a especificação vigente e quantificar a influência causada pela incorporação de cal hidratada no ligante asfáltico.

4.4.1 Processo de incorporação da cal no ligante asfáltico

O processo de incorporação da cal hidratada foi realizado, conforme já descrito na metodologia, ou seja, diretamente no ligante asfáltico em uma porcentagem correspondente àquela incorporada na mistura asfáltica projetada.

A incorporação da cal no ligante provoca um aumento em sua densidade, estes valores estão apresentados nos gráficos da Figura 57.

Como a cal dolomítica apresenta um maior peso específico em relação à cal calcítica ($2,32\text{g/cm}^3$ contra $2,24\text{g/cm}^3$) a variação da densidade da mistura ligante + cal foi maior também quando a mesma foi incorporada ao ligante. Variações semelhantes foram encontradas considerando os tipos diferentes de ligante asfáltico.

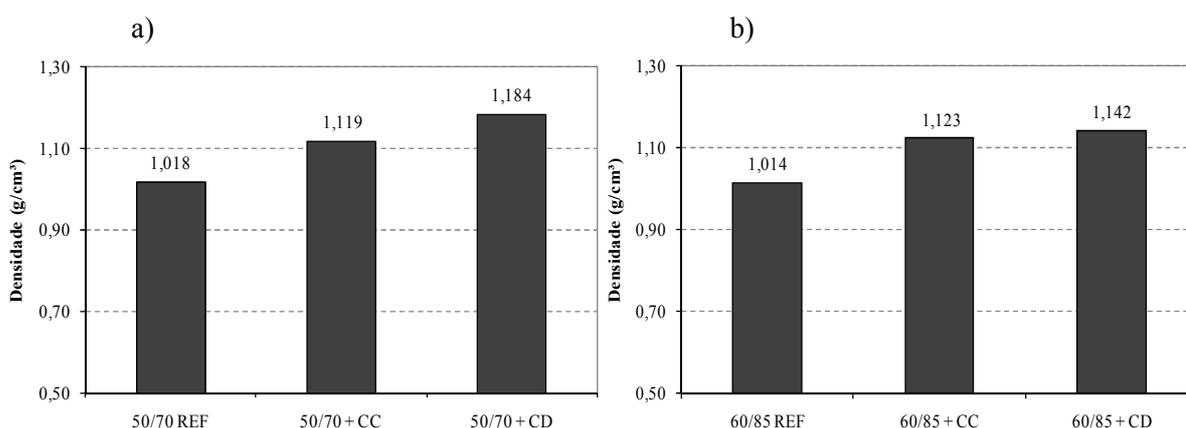


Figura 57: Densidade antes e após incorporação de cal (g/cm^3);
a) ligante convencional; b) ligante modificado

A partir das amostras puras e amostras com incorporação de cal foram realizados todos os demais ensaios descritos e analisados nos itens a seguir.

4.4.2 Ponto de amolecimento (PA)

Para ligante convencional CAP 50/70 o valor de ponto de amolecimento mínimo é de 46°C , para ligante modificado CAP 60/85-E este valor é de 60°C . O resultado do ligante convencional está dentro da especificação, porém, para o ligante modificado o valor encontrado está fora da especificação, cerca de 7°C abaixo do limite recomendado, foram realizadas novas determinações, os valores encontrados foram bastante semelhantes.

Em ensaios anteriormente realizados haviam sido encontrados valores coerentes com a especificação, porém, para a amostra em questão os valores foram inferiores como pode ser observado no gráfico da Figura 58. O material asfáltico utilizado nesta pesquisa foi acondicionado em latas de 3,6 litros, segundo a empresa fornecedora todo material é proveniente de uma única coleta. Os valores coerentes mencionados anteriormente foram encontrados no início da pesquisa, de uma amostra diferente da utilizada nestes ensaios.

Analisando o efeito da incorporação da cal diretamente no ligante asfáltico obtiveram-se aumentos no ponto de amolecimento inferiores para a cal calcítica, tanto para ligante convencional quanto para ligante modificado (sem considerar envelhecimento).

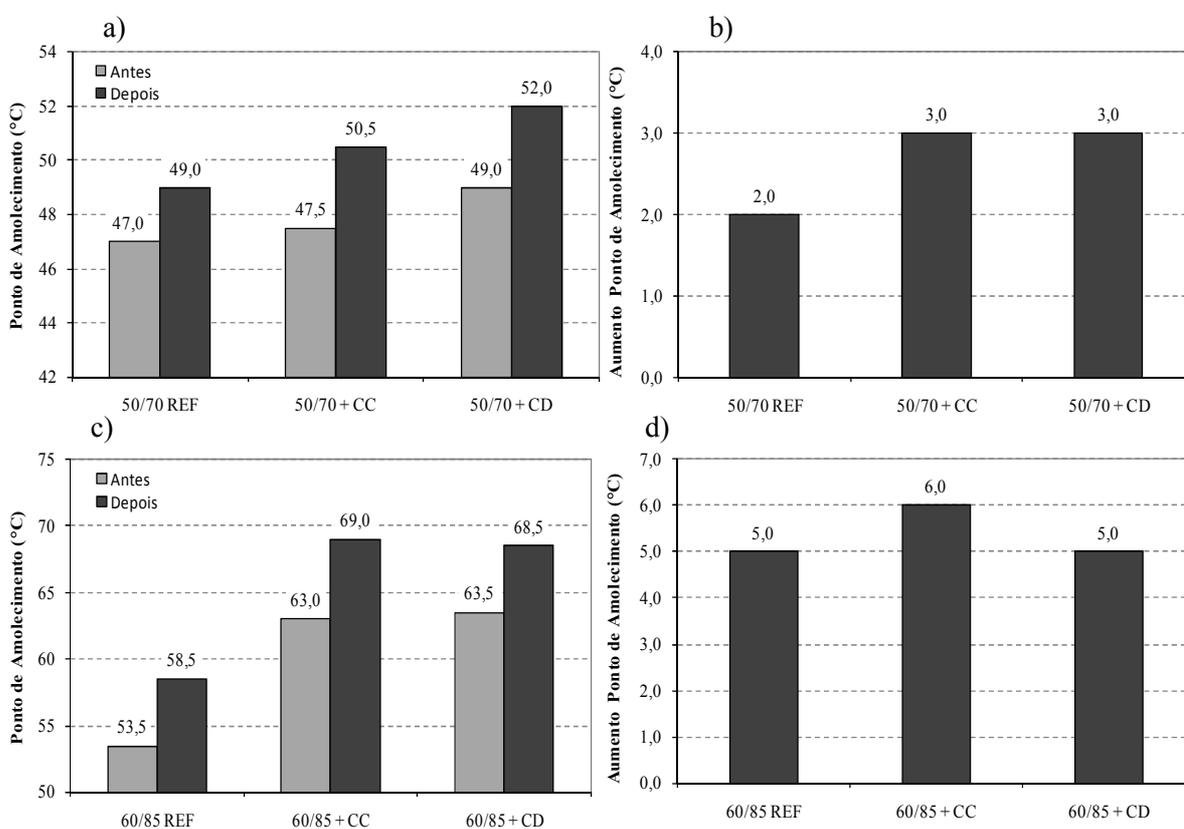


Figura 58: a) PA antes e após RTFOT ligante convencional (°C); b) Aumento PA (°C); c) PA antes e após RTFOT ligante modificado (°C); d) Aumento PA (°C)

Para valores de ponto de amolecimento após efeito de calor e ar (RTFOT) conforme especificação da ANP é aceitável um aumento de até 8°C no ponto de amolecimento após envelhecimento RTFOT para ligante convencional CAP 50/70 e uma variação de -5 a +7°C para ligante modificado CAP 60/85-E.

Os valores encontrados nos ensaios realizados estão todos dentro desta especificação, tanto para as amostras puras quanto para as amostras com cal hidratada, variações muito pequenas foram encontradas entre as amostras. Amostras com cal apresentaram aumento do ponto de amolecimento cerca de 1°C acima das misturas sem cal, com exceção para cal dolomítica em ligante modificado, que apresentou o mesmo valor de aumento após envelhecimento que a amostra sem incorporação de cal.

4.4.3 Penetração (PN)

Comportamento já esperado nos resultados de penetração, a diminuição deste valor ocasionada pela incorporação de cal foi mais pronunciada em amostras com ligante convencional, conforme pode ser observado nos valores de penetração retida que corresponde à relação entre a penetração após o efeito do calor e do ar em estufa RTFOT e a penetração antes do ensaio (Figura 59).

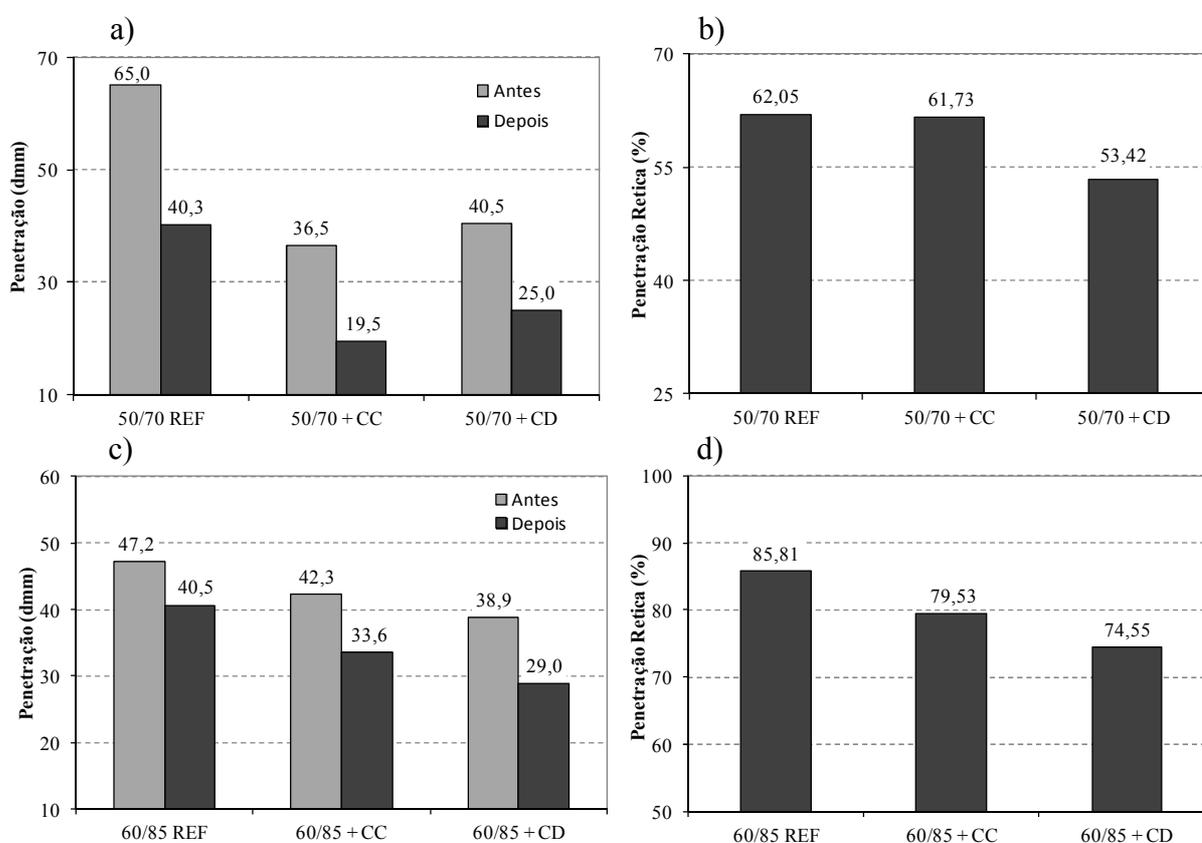


Figura 59: a) PN antes e após RTFOT ligante convencional (dmm); b) Penetração retida (%); c) PN antes e após RTFOT ligante modificado (dmm); d) Penetração retida (%)

Os valores mínimos especificados de penetração retida são de 55% para ligante convencional e de 60% para ligante modificado, estes valores somente não foram atendidos em amostras com ligante convencional e incorporação de cal dolomítica (53,4%).

Ao analisar a influência do tipo de cal, a mesma tendência foi observada para os dois tipos de ligante, incorporando a cal os valores de penetração foram reduzidos com maior intensidade em amostras com cal dolomítica, ocasionando conforme mencionado acima, uma não conformidade com a especificação.

4.4.4 Variação de massa

A variação de massa devido à evaporação de voláteis durante o processo de envelhecimento é apresentada na Figura 60. Limites aceitáveis de variação são de 0,5% para mais ou para menos. Nas amostras ensaiadas foram observadas apenas perdas de massa, todas dentro do limite aceitável, nenhum ganho foi registrado.

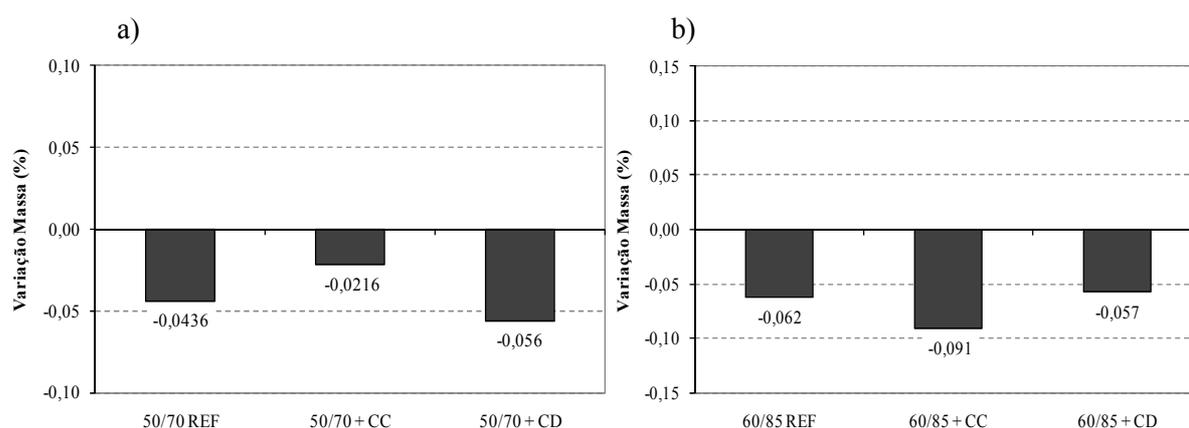


Figura 60: Variação de massa após envelhecimento RTFOT;
a) ligante convencional; b) ligante modificado (%)

Considerando amostras com ligante convencional observa-se que a variação foi maior para amostras com incorporação de cal dolomítica, anunciando possivelmente um processo mais acentuado de envelhecimento, com maior perda de voláteis durante o processo.

Valores tendendo a um maior envelhecimento já foram observados anteriormente nos resultados de penetração, onde o limite de penetração retida especificada foi ultrapassado pelo mesmo material. Para esclarecer melhor esse processo, resultados de viscosidade antes e após processo de envelhecimento serão analisados no item seguinte. Para amostras com ligante modificado, variações maiores foram observadas nas amostras com cal calcítica. Com incorporação de cal dolomítica a variação de massa foi inferior à amostra de ligante puro.

4.4.5 Variação de viscosidade em função do processo de envelhecimento

A seguir são apresentados os resultados de variação da viscosidade do ligante asfáltico puro e com incorporação de cal hidratada (calcítica e dolomítica), com dois tempos de envelhecimento em estufa RTFOT, o primeiro de 85 minutos conforme preconizado em norma e o segundo de 120 minutos para avaliar a influência do tempo de envelhecimento no ligante asfáltico puro e nas composições ligante asfáltico + cal hidratada.

Os valores de viscosidade foram obtidos através de um viscosímetro rotacional nas temperaturas de 135°C, 155°C, 175°C e 195°C. Nos gráficos a seguir são apresentados os valores do índice de envelhecimento (*Aging Index*). Este índice é representado pela razão η_a/η_o , onde η_a representa a viscosidade em uma data de condição de envelhecimento e η_o , representa a viscosidade inicial do ligante asfáltico.

4.4.5.1 Ligante convencional CAP 50/70

Os resultados apresentados na Figura 61 correspondem à variação do índice de envelhecimento após um período de 85 minutos para ligante convencional em sua forma pura (50/70 REF), com incorporação de cal calcítica (50/70+CC) e com cal dolomítica (50/70+CD). Primeiramente observa-se uma notável diferença entre a influência exercida pelos dois tipos de cal, principalmente em temperaturas mais baixas e intermediárias, com uma tendência à igualdade em temperaturas mais elevadas.

Amostras com cal calcítica apresentaram uma variação de viscosidade bastante inferior ao ligante puro (de 10% a 5% menores), demonstrando sua influência positiva reduzindo o enrijecimento/envelhecimento do ligante asfáltico. Já as amostras com cal dolomítica apresentaram variações de viscosidade superiores ao ligante puro em temperaturas de até 155°C, exercendo uma influência negativa no ligante asfáltico, favorecendo a um maior enrijecimento após o processo de envelhecimento.

Com o aumento da temperatura as variações de viscosidade das amostras com cal dolomítica tendem aos mesmos valores das amostras com cal calcítica, com variações inferiores às amostras de ligante puro. Este fato demonstra que a cal dolomítica promove uma maior suscetibilidade térmica ao ligante, já a cal calcítica torna o ligante menos suscetível à variação de temperatura e ao envelhecimento.

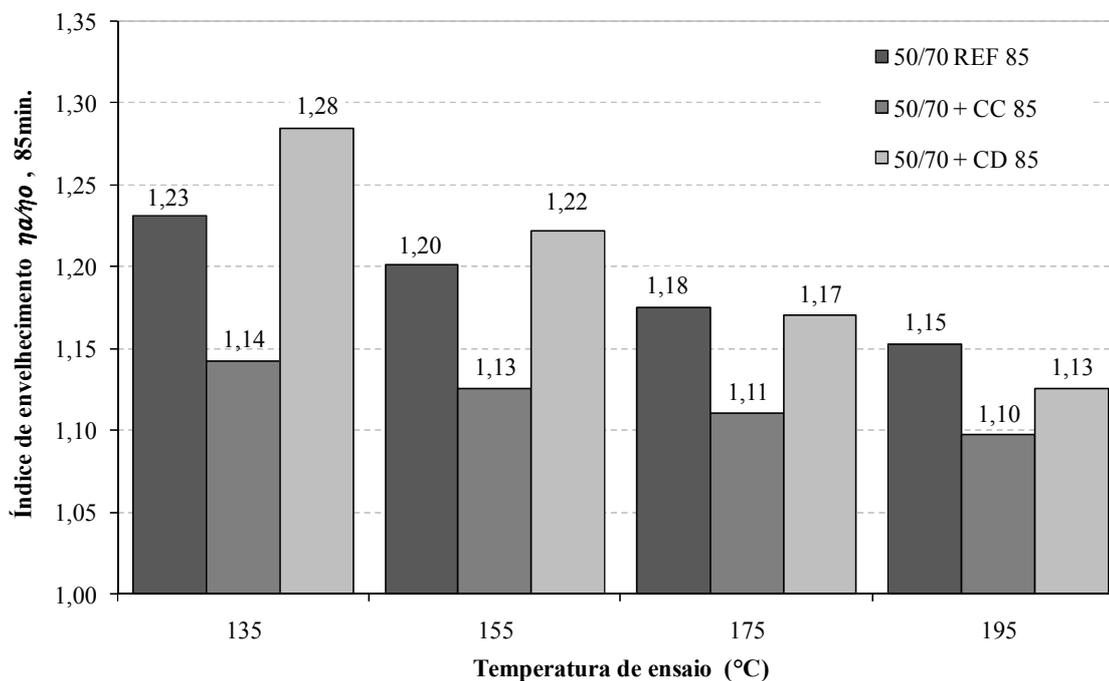


Figura 61: Índice de envelhecimento de amostras de Referência (ligante puro) e amostras com incorporação de cal calcítica (CC) e dolomítica (CD) após 85 minutos em estufa RTFOT (razão entre viscosidade após envelhecimento e viscosidade inicial) CAP 50/70

Além de analisar a influência do tipo de cal no processo de envelhecimento do ligante asfáltico conforme metodologia preconizada em norma com um tempo de envelhecimento de 85 minutos em estufa RTFOT, procurou-se ainda verificar a influência do tempo de envelhecimento, realizando ensaios com um tempo mais elevado de envelhecimento, passando de 85 minutos para um período de 120 minutos.

Na Figura 62 são apresentados os resultados conforme definido anteriormente para o tempo de envelhecimento de 85 minutos, porém neste caso, as variações percentuais do índice de envelhecimento correspondem a um tempo de envelhecimento de 120 minutos.

Observa-se praticamente a mesma tendência, enquanto amostras com cal calcítica apresentam valores inferiores de variação, amostras com cal dolomítica apresentam valores de variação superiores, porém com variações mais próximas às amostras de ligante puro, sem apresentar a tendência de aproximação ao comportamento das amostras com cal calcítica nem com variações inferiores às amostras de ligante puro em temperaturas mais elevadas conforme observado no comportamento com envelhecimento de 85 minutos.

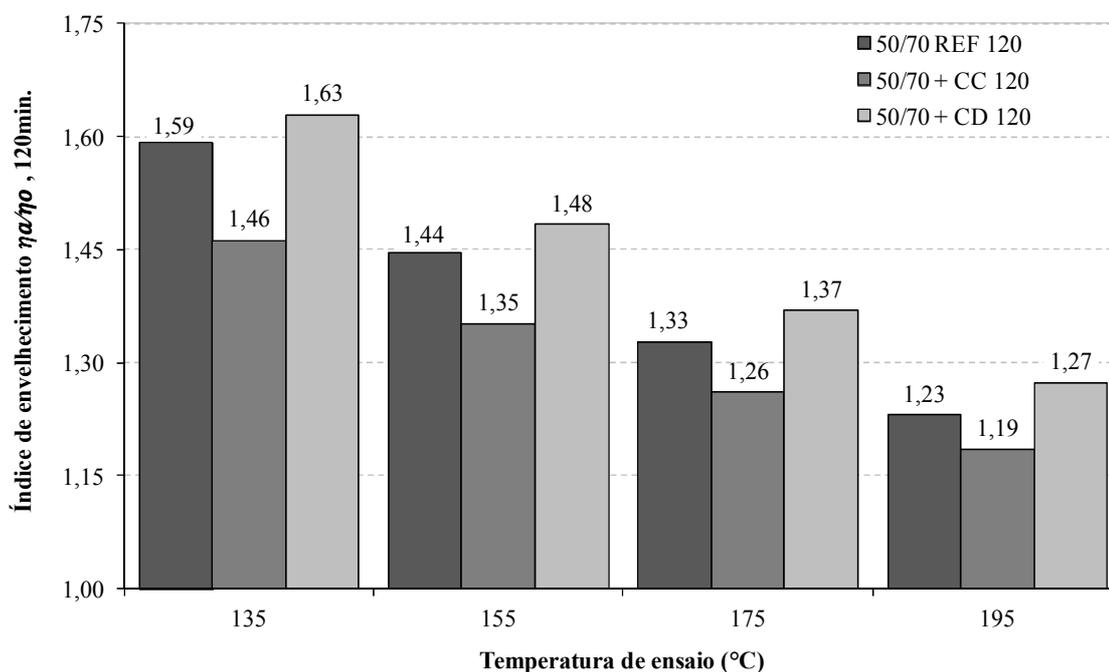


Figura 62: Índice de envelhecimento de amostras de Referência (ligante puro) e amostras com incorporação de cal calcítica (CC) e dolomítica (CD) após 120 minutos em estufa RTFOT (razão entre viscosidade após envelhecimento e viscosidade inicial) CAP 50/70

Analisando os percentuais de variação devido ao tempo de envelhecimento (Figura 63) percebe-se que os percentuais são mais elevados para temperaturas baixas (com variações maiores para ligante puro), na temperatura de 155°C há uma tendência à equivalência nos valores. Em temperaturas mais elevadas há uma inversão de comportamento, onde as amostras com cal, principalmente dolomítica, apresentam valores maiores de variação de viscosidade quando comparadas com amostras de ligante puro, com destaque para o aumento bastante acentuado das amostras com cal dolomítica e uma equivalência das amostras com ligante puro com as amostras que contém cal calcítica.

Uma observação importante a ser mencionada sobre os resultados aqui apresentados está no fato de que, com o aumento do tempo de envelhecimento, em temperaturas mais baixas, as misturas com cal dolomítica, apresentam um menor percentual de variação de viscosidade.

Em temperaturas mais elevadas, a influência do aumento no tempo de envelhecimento foi mais significativo nas amostras com cal dolomítica, ficando bastante semelhantes ao comparar misturas com cal calcítica e ligante puro.

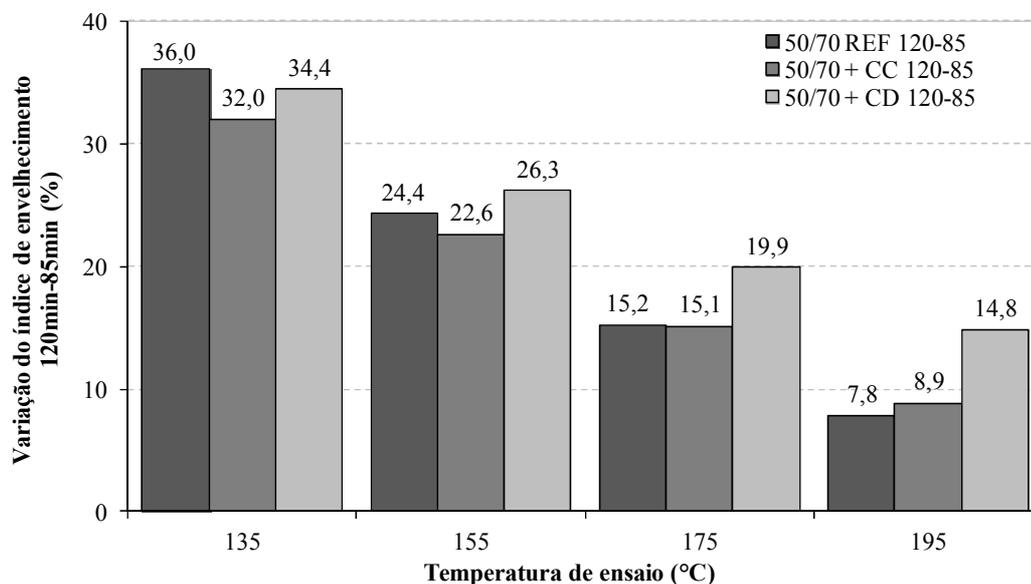


Figura 63: Variação percentual do índice de envelhecimento das amostras de Referência (ligante puro CAP 50/70) e com incorporação de cal (120 minutos - 85 minutos)

Amostras com cal calcítica aparentemente começaram a apresentar um aumento de viscosidade bastante compatível com o ocorrido nas amostras com ligante puro, chegando em temperaturas mais elevadas até a apresentar variações maiores, mas menos significantes quando comparados com amostras com cal dolomítica.

Pode-se considerar com os resultados aqui expostos que a influência da cal no envelhecimento do ligante asfáltico convencional é fortemente dependente do tipo de cal (calcítica aparenta ser melhor) e do tempo de envelhecimento, em tempos estipulados pela normatização, a cal calcítica apresentou resultados satisfatório no que diz respeito ao menor envelhecimento/enrijecimento do ligante.

4.4.5.2 Ligante modificado CAP 60/85-E

Os valores de variação do índice de envelhecimento para as amostras com ligante modificado puro e com incorporação de cal estão apresentados na Figura 64. As variações foram inferiores às ocorridas com ligante convencional, conforme já era esperado, pois a modificação do ligante por polímeros elastoméricos além de outras funções torna o material menos suscetível termicamente.

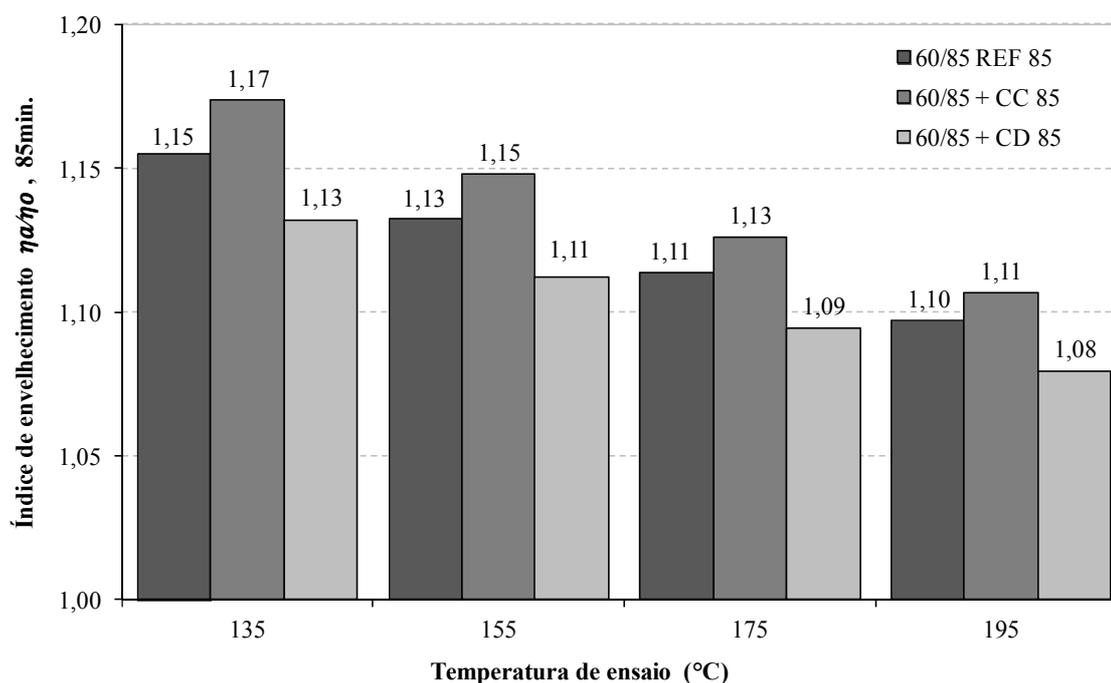


Figura 64: Índice de envelhecimento de amostras de Referência (ligante puro) e amostras com incorporação de cal calcítica (CC) e dolomítica (CD) após 85 minutos em estufa RTFOT (razão entre viscosidade após envelhecimento e viscosidade inicial) CAP 60/85-E

As variações que ocorreram em função da incorporação de cal não foram muito significativas, sendo inferiores às ocorridas com ligante convencional. Apesar de pequenas as variações, o comportamento observado foi diferenciado quando comparado com o ocorrido com ligante convencional. No caso aqui analisado, a incorporação de cal calcítica provocou um enrijecimento/envelhecimento maior do que com ligante puro, um comportamento contrário foi observado com incorporação de cal dolomítica, representando uma menor suscetibilidade térmica.

Ao verificar a influência do tempo de envelhecimento nas amostras com ligante modificado (Figura 65), verifica-se principalmente uma tendência de aumento de envelhecimento das amostras com cal dolomítica, amostras que anteriormente apresentavam uma menor variação de viscosidade, com o aumento do tempo de envelhecimento passaram a apresentar uma maior variação. Este comportamento pode ser observado de forma mais clara na Figura 66, onde são apresentadas as variações percentuais em função do tempo de envelhecimento em estufa RTFOT.

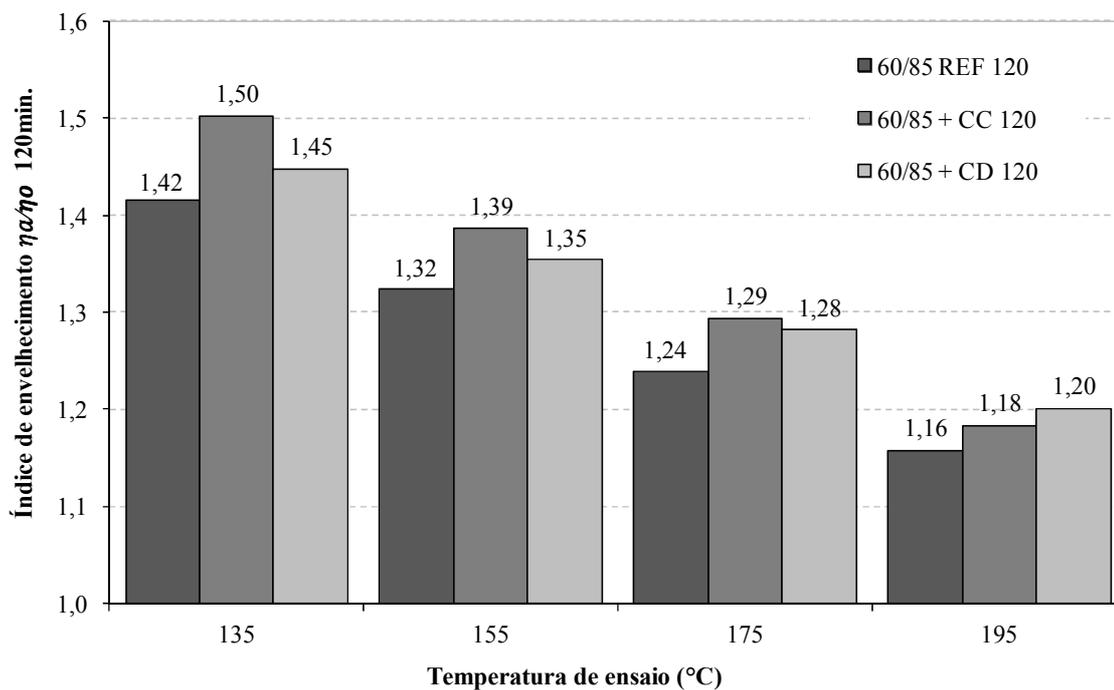


Figura 65: Índice de envelhecimento de amostras de Referência (ligante puro) e amostras com incorporação de cal calcítica (CC) e dolomítica (CD) após 120 minutos em estufa RTFOT (razão entre viscosidade após envelhecimento e viscosidade inicial) CAP 60/85-E

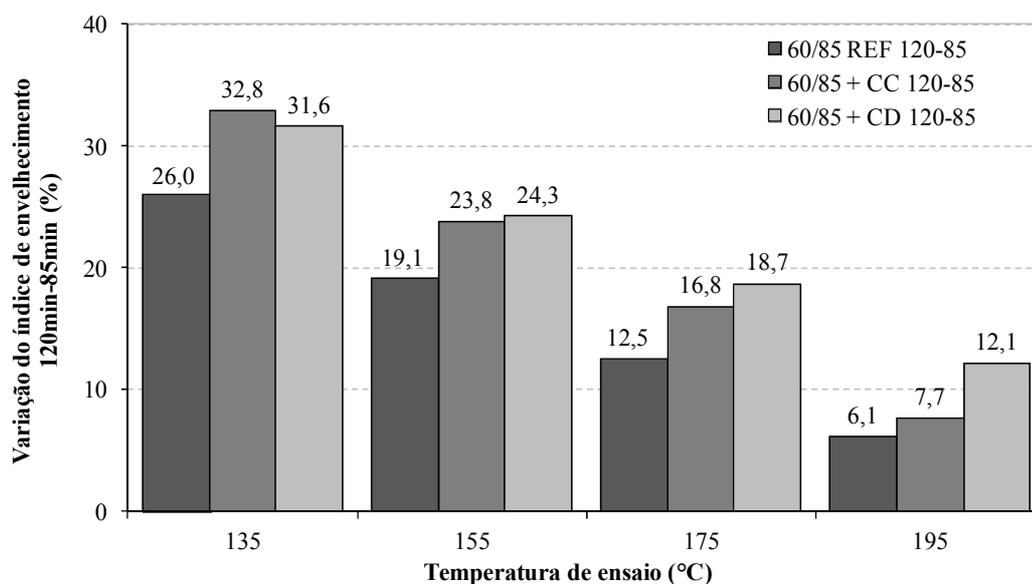


Figura 66: Variação percentual do índice de envelhecimento das amostras de Referência (ligante puro CAP 60/85-E) e com incorporação de cal (120 minutos - 85 minutos)

Observa-se principalmente que as amostras com incorporação de cal apresentaram uma maior variação de viscosidade em função do tempo de envelhecimento do que as amostras com ligante puro, demonstrando uma maior suscetibilidade térmica do ligante modificado quando o mesmo apresenta incorporação de cal. Comportamento distinto ao observado em amostras com ligante convencional e em diversos trabalhos internacionais sobre o assunto.

Como descrito em diversos trabalhos internacionais (JOHANSSON *et al.*, 1995; VERHASSELT *et al.*, 2001 *apud* EULA, 2010) em muitos ligantes asfálticos, a adição de cal hidratada promove uma redução da taxa de oxidação e envelhecimento. Este é um resultado das reações químicas que ocorrem entre o hidróxido de cálcio e as moléculas altamente polares do betume. As moléculas polares neutralizadas pela ação da cal permanecem fortemente fixadas sobre as partículas de cal hidratada. Isso as impede de reagir, reação essa que teria como consequência o envelhecimento químico do ligante, dessa forma há uma cinética global mais lenta neste envelhecimento.

Na presente pesquisa, o comportamento descrito anteriormente foi somente observado em amostras com ligante convencional, não sendo aplicável às amostras com ligante modificado.

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES

Neste capítulo são apresentadas as conclusões da pesquisa que teve como objetivo geral investigar a possibilidade de se produzir misturas asfálticas de elevado desempenho e durabilidade, por meio da incorporação de cal hidratada.

5.1 CONCLUSÕES

A partir dos ensaios laboratoriais realizados, dos resultados analisados e discutidos no Capítulo 4, é possível chegar às seguintes conclusões expressas a seguir.

Em uma análise global da influência da incorporação de cal hidratada em concretos asfálticos elaborados com ligante convencional e modificado percebeu-se, nesta pesquisa e para os materiais aqui empregados, que a melhoria das propriedades depende significativamente, além do tipo de cal (calcítica com melhores resultados), do tipo de ligante empregado na formulação das misturas.

De forma geral, melhorias mais significativas foram proporcionadas pela incorporação de cal (principalmente calcítica) em misturas com ligante convencional, em que as mesmas apresentavam comportamentos semelhantes ou até mesmo superiores às misturas com ligante modificado (sem cal), demonstrando dessa forma um grande potencial de melhoria destas misturas ao apresentar incorporação de cal de boa qualidade (aumento de resistência à deformação permanente, maior RT e MR, maior poder coesivo observado através da Metodologia UCL® e menor envelhecimento).

Os significativos aumentos de módulo de resiliência e resistência à tração que ocorreram em amostras preparadas com ligante convencional não foram observados em amostras com ligante modificado por polímeros elastoméricos. Supõe-se que, possivelmente, componentes do modificador podem estar reagindo com a cal neutralizando sua ação.

Neste sentido, torna-se importante a verificação do comportamento de misturas elaboradas com ligantes asfálticos modificados por diferentes polímeros, verificando qual a influência exercida pelo tipo de modificador na ação da cal hidratada em concretos asfálticos.

A incorporação de cal favoreceu as misturas asfálticas tornando-as menos suscetíveis à deformação permanente, os resultados obtidos evidenciam que a incorporação de cal tem a capacidade de aumentar sua resistência à deformação permanente, tornando as misturas menos deformáveis.

Em amostras sem incorporação de cal, para ambos os tipos de ligante, foram registradas deformações permanentes praticamente 26% superiores às registradas em amostras com cal calcítica; com cal dolomítica estes valores ficaram próximos a 14% e 17%, para amostras com ligante convencional e modificado, respectivamente.

A partir dos resultados obtidos no envelhecimento em estufa RTFOT verificou-se que a influência da cal no processo de envelhecimento de ligantes asfálticos é sensivelmente afetada pelo tipo de cal e tempo de envelhecimento, apresentando comportamentos distintos com ligantes convencionais e modificados. Foi possível observar que em ligantes convencionais a cal calcítica mostrou-se mais efetiva na redução do envelhecimento (menor enrijecimento).

Em relação ao teor de cal utilizado, não se observaram benefícios adicionais ao aumentar-se o teor de 1% para 2%. Esta constatação alinha-se com outras experiências nacionais e internacionais, onde geralmente os teores ótimos de cal estão compreendidos entre 1% e 2%, com relação ao peso seco dos agregados pétreos. Inclusive, observou-se uma queda tanto da RT quanto do MR ao utilizar 2% de cal, ficando estes valores até mesmo abaixo das misturas de Referência (sem cal).

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

A partir da investigação realizada nesta pesquisa sobre os efeitos da incorporação de cal hidratada em concretos asfálticos com ligante convencional e modificado foi possível verificar que é possível formular concretos asfálticos (CA) de elevado desempenho e durabilidade, através da incorporação de cal hidratada calcítica. Mesmo com uma redução do teor de ligante de projeto das misturas com cal, o que representa economia no processo de produção, houve um desempenho superior nas misturas com sua incorporação. Ressalta-se que o objetivo deste trabalho não está focado na economia de material, como por exemplo, de ligante asfáltico, mas sim na metodologia que proporcione o melhor desempenho.

O desempenho, quanto à resistência à tração, a resistência a deformações permanentes, susceptibilidade a variações térmicas e aos efeitos deletérios da água e do envelhecimento, de concretos asfálticos com ligante convencional e 1% de cal calcítica é semelhante, quando não supera o desempenho de misturas com ligante modificado por polímeros.

5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Com o objetivo de complementar os resultados obtidos na presente Dissertação e contribuir para a evolução do conhecimento do comportamento de misturas asfálticas 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;
- Investigar a influência do tipo de modificador polimérico no envelhecimento de amostras de ligante com incorporação de cal hidratada;
- Verificar a influência da cal no comportamento mecânico de misturas preparadas com ligantes modificados por distintos tipos de polímeros;
- Avaliar a resistência à fadiga e a influência da cal hidratada neste parâmetro;
- Realizar ensaios de Módulo Complexo (E^*) para verificar o comportamento das misturas considerando suas propriedades viscoelásticas, contabilizando os efeitos de diferentes temperaturas e frequências de carregamento;
- Executar e monitorar pistas experimentais através de ensaios acelerados ou trechos experimentais em rodovias para avaliar o desempenho dos concretos asfálticos com incorporação de cal hidratada em revestimentos de real escala.

REFERÊNCIAS

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/>> Acesso em: 30 de janeiro de 2012.

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.

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, 2006, 504p.

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, 122p.

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.sistemacnt.org.br/pesquisarodoviaria/2010> (acessado em 20/10/2010).

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.

DEPARTAMENTO AUTONOMO DE ESTRADAS E RODAGEM. **Concreto Asfáltico**. DAER/RS – ES 16/98. Porto Alegre, 1998, 21p.

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.

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.

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.

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.

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.

ROCHA, R. S.; COSTA, E. A. L. **Patologias de pavimentos asfálticos e suas recuperações – estudo de caso da Avenida Pinto de Aguiar**. Disponível em: <<http://info.ucsal.br/banmon>>. Acesso em: 28 nov. 2011.

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.