

UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE TRANSPORTES  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE TRANSPORTES

**O EFEITO DA MODIFICAÇÃO DE LIGANTE ASFÁLTICO COM O  
LÍQUIDO DA CASTANHA DE CAJU (LCC) NA RESISTÊNCIA AO DANO  
POR UMIDADE EM MISTURAS ASFÁLTICAS**

EDEILTO DE ALMEIDA RIBEIRO

ORIENTADORA: Prof<sup>a</sup>. PhD Verônica Teixeira Franco Castelo Branco  
CO-ORIENTADORA: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup> Sandra Aguiar Soares

Fortaleza, Ceará  
JULHO / 2011

UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE TRANSPORTES  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE TRANSPORTES

EDEILTO DE ALMEIDA RIBEIRO

**DISSERTAÇÃO**

**O EFEITO DA MODIFICAÇÃO DE LIGANTE ASFÁLTICO COM O LÍQUIDO  
DA CASTANHA DE CAJU (LCC) NA RESISTÊNCIA AO DANO POR  
UMIDADE EM MISTURAS ASFÁLTICAS**

Dissertação submetida à coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes da Universidade Federal do Ceará, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Transportes  
Área de Concentração: Infraestrutura de Transportes

Orientadora:

Verônica Teixeira Franco Castelo Branco

Co-Orientadora:

Sandra Aguiar Soares

Fortaleza, Ceará  
JULHO / 2011

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
Universidade Federal do Ceará  
Biblioteca de Pós Graduação em Engenharia

---

R368e      Ribeiro, Edeildo de Almeida.  
              O efeito da modificação de ligante asfáltico com o líquido da castanha de caju  
              (LCC) na resistência ao dano por umidade em misturas asfálticas /Edeildo de Almeida  
              Ribeiro. – 2011.  
134 f. : il. color., enc. ; 30 cm.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Departamento de  
Engenharia de Transportes, Programa de Mestrado em Engenharia de Transportes,  
Fortaleza, 2011.

Orientação: Profa. Dra. Verônica Teixeira Franco Castelo Branco.  
Coorientação: Profa. Dra. Sandra Aguiar Soares.

1. Transportes. 2. Misturas asfálticas. 3. Pavimentos flexíveis. I. Título.

CDD 388

---

**EFEITO DA MODIFICAÇÃO DE LIGANTE ASFÁLTICO COM O  
LÍQUIDO DA CASTANHA DE CAJU (LCC) NA RESISTÊNCIA AO DANO  
POR UMIDADE EM MISTURAS ASFÁLTICAS**

*Edeildo de Almeida Ribeiro*

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO PROGRAMA DE MESTRADO EM ENGENHARIA DE TRANSPORTES DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS À OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA DE TRANSPORTES.

Aprovada por:

---

Prof<sup>ª</sup>. Verônica Teixeira Franco Castelo Branco, PhD.  
(Orientadora)

---

Prof<sup>ª</sup>. Sandra de Aguiar Soares, Dc. Sc.  
(Co-Orientadora)

---

Prof<sup>ª</sup>. Jorge Barbosa Soares, PhD.  
(Examinador Interno)

---

Prof<sup>ª</sup>. Laura Maria Goretti da Mota  
(Examinadora Externa)

FORTALEZA, CE - BRASIL

JULHO / 2011

## DEDICATÓRIA

*A Deus por mais essa vitória, por ter me permitido realizar esse sonho, pelo conforto e força concedida para me levantar e vencer todas as batalhas. Ele que em todos os momentos nunca me abandonou e com certeza nunca vai me desamparar em minha caminhada futura. Pai, amigo, companheiro de jornada, te agradeço por ter me proporcionado essa vitória, pois sem Ti, nada somos e nada podemos.*

*”Seja o que for que você deseja realizar, é imprescindível dedicar a sua vida ao objetivo. Aquele que deseja viver plenamente, precisa dedicar-se a tudo o que faz. Se quer vencer uma luta, tem que dedicar a sua vida à luta. Ao dedicar sua vida a algum objetivo, não se poupe!”*

(M. Taniguchi)

*“...E nunca considerem o seu estudo como uma obrigação, mas sim como uma oportunidade invejável de aprender sobre a influência libertadora da beleza no domínio do espírito para seu prazer pessoal e para o proveito da comunidade à qual pertencerá seu trabalho futuro!”*

(A. Einstein)

*“Para um homem ou para uma nação, o descontentamento é o primeiro passo para o progresso.”*

(O. Wilde)

*“Se algum dia vocês forem surpreendidos pela injustiça ou pela ingratidão, não deixem de crer na vida, de engrandecê-la pela decência, de construí-la pelo trabalho.”*

(E. Queiroz)

*“Que importam os perigos ou os sacrifícios de um homem ou de um povo, quando está em jogo o destino da humanidade.”*

(C. Guevara)

*“Aquele que conhece a si mesmo e o inimigo ainda que em 100 batalhas, jamais correrá perigo. Aquele que conhece a si mesmo, mas não conhece o inimigo, correrá perigo em todas as batalhas.”*

(S. Tzu)

*“Quando você não está feliz, é preciso ser forte para mudar, resistir à tentação do retorno. O fraco não vai a lugar algum.”*

(Ayrton Senna)

## AGRADECIMENTOS

- Minhas palavras são incapazes de expressar a Deus, a gratidão que existe em meu coração por todo bem que fez e ainda fará por mim. Agradeço ao Senhor por ter estado ao meu lado, por seu fiel testemunho e por ter me utilizado como ferramenta para que esse trabalho pudesse ser concluído. Ao Seu filho amado Jesus Cristo também agradeço pela conclusão desse trabalho, se cheguei até aqui, é porque Ele me trouxe em Seus braços. Ao divino Espírito Santo, criador e renovador de todas as coisas, vida minha e a Maria Santíssima, eu Vos adoro e também Vos agradeço por mais essa conquista!
- A Prof<sup>a</sup> Verônica na qual Deus escolheu para ser minha orientadora, agradeço não apenas pela transmissão de conhecimento mas pela paciência, dedicação e disponibilidade. A essa mulher forte e guerreira que esteve ao meu lado nessa “estrada”, que fez brotar duas ideias onde antes só havia uma. A senhora ofereço humildemente a minha eterna gratidão!
- Minha co-orientadora Prof<sup>a</sup> Sandra que sempre se dispôs a esclarecer minhas dúvidas na área de Química, agradeço pelos ensinamentos, experiência, por sua alegria contagiante e por fazer do aprendizado não um trabalho mas um contentamento;
- Ao prof<sup>o</sup> Jorge pela paciência, incentivo, conhecimento e profissionalismo;
- Aos meus pais Expedito e Ednês e a minha irmã Edlane, fiéis testemunhas de horas e horas de dedicação a este trabalho, agradeço pela paciência e compreensão no qual procuro arduamente uma forma verbal de expressar essa emoção ímpar. Amo vocês!
- A todos meus familiares das famílias Almeida e Ribeiro em especial ao meu padrinho Chicó (*in memoriam*) que já se encontra nos braços do Pai e no qual também dedico essa conquista;
- Aos professores do Departamento de Engenharia de Transportes: Ant<sup>o</sup> Paulo, Sérgio, Áurea, Uchôa e em especial aos professores Ernesto, Felipe Loureiro e Suelly Helena;
- Aos colegas de pós-graduação: Enson, Bruno Maia, Lélío, Pedro Custódio, Marcílio, Bruno Thé e aos engenheiros civis Humberto, Rafael e Rosa Angélica. Agradeço a todos pelos momentos de alegria e tristeza e por toda a dificuldade que passamos juntos que culminaram no nosso amadurecimento;
- A Comunidade Católica Face de Cristo em especial ao grupo de oração Nova Aliança. Gostaria de expressar minha gratidão ao Thiago Camelo, Renan Bezerra, Jussara Montenegro, Karla Monique e principalmente à Carla Fontenele por suas orações;

- Ao Grupo de Oração Universitário (GOU) Guerreiros por suas orações, em especial aos irmãos em Cristo Márcio, Evilásio, Sinardo e Arthur;
- Aos amigos Geraldo, Válber, Nelita, Janaína, Osvalrita, Samara, Patrícia e Alessandra;
- Aos amigos do grupo de Ligantes: Cícero, Alberto, Jaílson, Flávia, Paulo Roberto, Dearlan, Gardênia e em especial à Ellen e a Fabíola pelos momentos de descontração e experiências trocadas;
- A todo o grupo de Misturas Asfálticas e os demais amigos do Laboratório de Mecânica dos Pavimentos (LMP): Armando, Ráisse, Manuela, Jardel, Márcio, Felipe, Iuri, Ryan, João Luiz, Lorrán em especial ao Fernando Felipe pela ajuda prestada ao longo desse período de lutas;
- Aos laboratoristas Rômulo e Gerson pela moldagem dos corpos de prova e experiências trocadas. Ao laboratorista André pela disponibilidade da estufa do grupo de solos para a realização dos ensaios condicionados;
- Ao Departamento de Química Orgânica e Inorgânica da UFC, ao Ordelei e Elis pela realização do ensaio de infravermelho e a Teresa pela realização do ensaio de termogravimetria (TG) e calorimetria exploratória diferencial (DSC);
- Ao Departamento de Física, ao prof<sup>o</sup> Sasaki pela realização do ensaio de Fluorescência de Raio-X;
- À CAPES, Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, pelo financiamento de minha bolsa de mestrado;
- À fábrica de Castanha Iracema pela disponibilidade do LCC e à Lubnor pela cessão do ligante asfáltico utilizado nessa pesquisa;
- Ao DER-CE, pelo apoio oferecido durante a realização de parte dos ensaios laboratoriais, em especial ao Dr. Franklim Chaves e a Dr<sup>a</sup> Olga Chaves, pela ajuda tão importante e com a maior boa vontade;
- Ao NUTEC, em especial ao Antônio pela ajuda e pelas ferramentas concedidas para a realização do ensaio de desgaste Cântabro;
- A pedreira de Itaitinga (MFT) pelo fornecimento dos agregados e à Carbomil pelo fornecimento da cal;
- A todos os funcionários e ex-funcionários do Departamento de Engenharia de Transportes (DET) especialmente a Dona Gorete, Ivone, Danielle, Bóris enfim a todos aqueles que participaram da realização desse trabalho de maneira direta ou indireta, gostaria de expressar novamente minha eterna gratidão.



Resumo da Dissertação submetida ao PETRAN/UFC como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Ciências (M.Sc.) em Engenharia de Transportes.

**O EFEITO DA MODIFICAÇÃO DE LIGANTE ASFÁLTICO COM O LÍQUIDO DA CASTANHA DE CAJU (LCC) NA RESISTÊNCIA AO DANO POR UMIDADE EM MISTURAS ASFÁLTICAS**

Edeilto de Almeida Ribeiro  
Julho de 2011

Orientadora: Verônica Teixeira Franco Castelo Branco  
Co-Orientadora: Sandra Aguiar Soares

O dano por umidade é um defeito frequente e um dos principais responsáveis pelo desgaste prematuro de pavimentos. Esta pesquisa apresenta uma avaliação do potencial do LCC como modificador de ligante asfáltico com relação à resistência ao dano por umidade em misturas asfálticas. Propriedades físico-químicas do Líquido da Castanha de Caju (LCC) mostram-se potencialmente úteis para conferir ao Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP) maior adesão com os agregados. Utilizou-se um CAP convencional classificado por penetração como 50/70 e um CAP modificado com 2% de LCC caracterizados química e reologicamente. Os agregados foram caracterizados através da fluorescência de Raio-X e com relação à forma. Foram dosadas, segundo o método Superpave, diferentes misturas asfálticas contendo como ligante: CAP, CAP modificado com LCC e CAP e cal como fíler. A caracterização mecânica das misturas foi realizada através dos ensaios *Lottman* modificado, Módulo de Resiliência (MR) e desgaste Cântabro. Utilizou-se o Processamento Digital de Imagens (PDI) para verificar o deslocamento da película de CAP. Constatou-se que o LCC diminuiu a viscosidade e reduziu as Temperaturas de Usinagem e Compactação (TUC) do CAP. Ambas as amostras, CAP e CAP modificado com 2% de LCC, foram classificadas como PG 70-28. Os agregados foram classificados como graníticos, sub-arredondados, com baixa esfericidade e de textura lisa. Os resultados mostraram que a mistura com CAP modificado com LCC apresentou menor percentual de descolamento da película de CAP e desempenho mecânico satisfatório se comparada às outras misturas analisadas. Espera-se que o LCC possa ser utilizado como aditivo gerando misturas asfálticas menos suscetíveis à ação deletéria da água.

Palavras-chave: Misturas Asfálticas, Dano por Umidade Induzida, Líquido da Castanha de Caju (LCC)

Abstract of Thesis submitted to PETRAN/UFC as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.) in Transportation Engineering.

**EVALUATION OF MOISTURE DAMAGE IN HOT MIXTURE ASPHALT (HMA) CONTAINING CASHEW NUT SHELL LIQUID (CNSL) MODIFIED ASPHALT BINDER**

Edeildo de Almeida Ribeiro  
July, 2011

Advisor: Verônica Teixeira Franco Castelo Branco

Co-Advisor: Sandra Aguiar Soares

Moisture damage is a frequent distress on pavements and is considered a major contributor to premature deterioration. Physicochemical properties of the Cashew Nut Shell Liquid (CNSL) showed to be potentially useful to improve the adhesion between asphalt binder and aggregates. The main objective of this study is to evaluate the potential of the CNSL modified asphalt binder to increase the hot mixture asphalt (HMA) resistance to moisture damage, and as a promoter of adhesiveness between binder and aggregates. Pure and modified asphalt binders with different CNSL contents were characterized chemically and rheologically. The aggregates were characterized by X-ray fluorescence and using Aggregate Imaging Measurement System (AIMS). HMAs with binders modified with CNSL were designed using the Superpave methodology. HMA mechanical characterization consisted of modified *Lottman* test, Resilient Modulus and Cantabro. Results were compared with those obtained using two different HMAs: (i) one with conventional asphalt binder and natural aggregates, and (ii) another one using 2% of lime as a filler. The stripping resistance of asphalt binders were characterized through digital image processing (DIP). The findings showed the CNSL decreased the asphalt binder viscosity. Both, the pure and the modified asphalt binder, were classified as PG 70-28. The granitic aggregates were classified as sub rounded, with low sphericity and smooth texture. The findings showed that the HMA contain binder modified with CNSL had better stripping resistance and behavior mechanical performance than other evaluated HMAs. It's expected that the effectiveness of the CNSL can be used as an additive to prevent striping in asphalt mixtures and to provide a greater resistance to breakdown caused by water.

Keywords: Asphalt Mixtures, Moisture Damage, Cashew Nut Shell Liquid (CNSL)

## SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 .....	1
INTRODUÇÃO.....	1
1.1. Considerações Iniciais .....	1
1.2. Conceitos Básicos e Generalidades sobre a Pavimentação .....	3
1.3. A Malha Rodoviária Brasileira.....	5
1.4. Investimentos Federais em Rodovias .....	7
1.5. A Malha Rodoviária Cearense.....	8
1.6. Objetivos da Pesquisa.....	10
1.7. Estrutura do Trabalho .....	10
CAPÍTULO 2 .....	12
REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	12
2.1. Dano por Umidade em Misturas Asfálticas.....	12
2.2. Origem da Água no Pavimento .....	14
2.3. Mecanismos Responsáveis pela Perda da Adesividade a Nível Micro .....	16
2.3.1. Reação Química.....	17
2.3.2. Energia de Superfície .....	17
2.3.3. Orientação Molecular .....	18
2.3.4. Adesão Mecânica.....	19
2.4. Mecanismos Responsáveis pela Perda da Adesividade a Nível Macro .....	19
2.4.1. Descolamento .....	19
2.4.2. Deslocamento .....	20
2.4.3. Emulsificação Espontânea .....	21
2.4.4. Pressão Neutra .....	21
2.4.5. Polimento Hidráulico.....	22
2.5. Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP), Agregados e Volume de vazios (Vv): Características Relacionadas ao Dano por Umidade de uma Mistura Asfáltica .....	22
2.5.1. Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP) .....	22
2.5.2. Agregados .....	24
2.5.3. Volume de vazios (Vv).....	26
2.6. Líquido da Castanha de Caju (LCC) .....	29
2.7. Cal.....	32
2.8. Agentes Melhoradores de Adesividade (AMA) .....	33
2.9. Principais Técnicas Utilizadas para a Caracterização do CAP Convencional e Modificado .....	35
2.9.1. Espectroscopia na Região do Infravermelho (IV) .....	35
2.9.2. Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC).....	37

2.9.3. Termogravimetria (TG) .....	40
2.9.5. Viscosidade.....	42
2.10. Ensaio para Avaliação da Resistência ao Dano por Umidade em Misturas Asfálticas .....	48
2.10.1. Ensaio <i>Lottman</i> Original.....	48
2.10.2. Ensaio <i>Lottman</i> Modificado .....	49
2.10.3. Condicionamento Tunnickliff & Root.....	51
2.10.4. Simulador <i>Hamburg</i> .....	52
2.10.5. Ensaio de Imersão Química.....	54
2.10.6. Desgaste Cântabro .....	56
2.10.7. Módulo de Resiliência (MR) .....	57
2.11. Ensaio para Avaliação da Energia de Superfície .....	59
2.11.1. Placas de Wilhelmy (Wilhelmy Plates - WP).....	60
2.11.2. Dispositivo de Absorção Universal ( <i>Universal Sorption Device</i> - USD) .....	61
2.11.3. Microcalorímetro .....	62
2.12. Modelagem de Dano por Umidade.....	64
CAPÍTULO 3 .....	67
MATERIAIS E MÉTODOS.....	67
3.1. Características dos Materiais deste Estudo.....	67
3.1.1. Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP) .....	67
3.1.2. Líquido da Castanha de Caju (LCC) .....	68
3.1.3. Cal Hidratada.....	69
3.1.4. Agregados .....	69
3.2.1. Modificação do CAP .....	70
3.3. Ensaio para Caracterização do CAP .....	71
3.3.1. Infravermelho (IV) .....	71
3.3.2. Análise Termogravimétrica (TGA) .....	72
3.3.3. Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC).....	72
3.3.4. Estudo do Envelhecimento Oxidativo em Estufa de Filme Fino Rotativo.....	73
3.3.5. Determinação da Viscosidade .....	73
3.3.6. Ensaio em Reômetro de Cisalhamento Dinâmico (DSR) .....	74
3.3.7. Ensaio em Reômetro de Fluência em Viga (BBR) .....	75
3.4. Agregados.....	76
3.4.1. Caracterização Química.....	76
3.4.2. Caracterização dos Agregados com Relação à Angularidade, Esfericidade e Textura.....	77
3.5. Dosagem das Misturas Asfálticas.....	78
3.5.1. Definição das Curvas Granulométricas .....	78

3.5.2. Confeção e Dosagem das Misturas Asfálticas.....	80
3.6. Ensaio para Caracterização das Misturas Asfálticas.....	82
3.6.1. Ensaio <i>Lottman</i> modificado.....	82
3.6.2. Desgaste Cântabro .....	85
3.6.3. Módulo de Resiliência (MR) .....	85
CAPÍTULO 4 .....	87
RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	87
4.1. Ensaio de Caracterização do CAP .....	87
4.1.1. Análise Térmica.....	87
4.1.1.1. Análise Termogravimétrica (TGA) .....	87
4.1.1.2. Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC) .....	89
4.1.2. Caracterização Estrutural.....	90
4.1.2.1. Espectroscopia Vibracional de Absorção no Infravermelho .....	90
4.1.3. Ensaio Reológicos.....	92
4.1.3.1. Determinação da Viscosidade .....	92
4.1.3.2. Determinação das Temperaturas de Usinagem e Compactação (TUC) pelo Método Tradicional e pelo Método Casola .....	93
4.1.3.3. Grau de Desempenho (PG).....	96
4.1.3.4. Curva Mestre .....	97
4.2. Ensaio para Caracterização dos Agregados .....	101
4.2.1. Caracterização Tradicional dos Agregados .....	101
4.2.1. Caracterização Química dos Agregados.....	103
4.2.2. Caracterização dos Agregados com Relação à Angularidade, Esfericidade e Textura.....	104
4.2.3. Processamento Digital de Imagens (PDI).....	107
4.3. Ensaio de Caracterização da Mistura Asfáltica.....	109
4.3.1. Dosagem e Caracterização das Misturas Asfálticas .....	109
4.3.2. Ensaio <i>Lottman</i> modificado.....	111
4.3.3. Módulo de Resiliência (MR) .....	115
4.3.4. Relação MR/RT .....	118
4.3.5. Desgaste Cântabro .....	121
4.3.6. Comentários Finais .....	124
CAPÍTULO 5 .....	125
CONCLUSÕES E SUGESTÕES.....	125
5.1. Sugestões para Trabalhos Futuros .....	127
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	129

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1.1 – Seção transversal típica de um pavimento: (a) Flexível e (b) Rígido (Menezes, 2003) .....	4
Figura 1.2 – Aplicação e transferência de cargas nos pavimentos rígidos e flexíveis (Specht, 2010).....	5
Figura 1.3 – Arrecadação CIDE – combustíveis entre 2002 e 2008 (IPEA, 2010).....	8
Figura 1.4 – Classificação geral – CE (CNT, 2011).....	9
Figura 2.1 – Principais defeitos agravados pela água em pavimentos (Arambula, 2007; Bernucci <i>et al.</i> , 2007) .....	12
Figura 2.2 – Fontes de água na estrutura do pavimento (Azevedo, 2007) .....	14
Figura 2.3 – Representação esquemática da ascensão capilar (Pereira, 2003).....	15
Figura 2.4 – Falha coesiva <i>versus</i> falha adesiva na mistura asfáltica (Kringos, 2007) ...	16
Figura 2.5 – Bombeamento de água no pavimento ocasionando o espalhamento através: (a) da ação do tráfego, (b) do excesso de pressão neutra e (c) do fluxo de água (Kringos, 2007) .....	21
Figura 2.6 – Representação molecular dos componentes do CAP (Bernucci <i>et al.</i> , 2007).....	22
Figura 2.7 – Esquema representativo do envelhecimento do CAP puro e oxidado (Peterser <i>et al.</i> , 1993).....	24
Figura 2.8 – Teor de sílica presente nos principais tipos de agregados utilizados em misturas asfálticas (Liberatori e Constantino, 2006).....	25
Figura 2.9 – Química do par CAP/agregado (Shah, 2003).....	26
Figura 2.10 – Classificação do Vv em misturas asfálticas (Adaptado de Furlan, 2006).....	27
Figura 2.11 – Análise da distribuição do Vv do CP divididos em três regiões homocêntricas cilíndricas (Adaptado de Nascimento <i>et al.</i> , 2006) .....	28
Figura 2.12 – Distribuição do Vv em CPs compactados pelos métodos: (a) Marshall, (b) Superpave e (c) extraídos da pista (Nascimento <i>et al.</i> , 2006) .....	28
Figura 2.13 – (a) Caju, castanha de caju e LCC, (b) Corte transversal da castanha e (c) Corte longitudinal ao longo da linha natural de clivagem utilizado para a remoção da amêndoa (França, 2007; Mazzeto e Lomonaco, 2009).....	29
Figura 2.14 – Composição química do LCC (Mazzeto e Lomonaco, 2009).....	30
Figura 2.15 – Processo de descarboxilação do ácido anacárdico em cardanol (França, 2007).....	31
Figura 2.16 – (a) Características das aminas presentes em um DOPES e (b) Formação da ligação química entre o CAP e agregados (Little e Bhasin, 2005 e Liberatori e Constantino, 2006).....	35
Figura 2.17 – Esquema representativo de um espectrômetro de infravermelho (Paolini, 2010).....	36
Figura 2.18 – Esquema de um cristal de ATR (Vasconcelos, 2010).....	37

Figura 2.19 – Representação de uma curva típica obtida no DSC: I – transição vítrea, II – temperatura de cristalização, III – temperatura de fusão e IV – processo oxidativo (Bernal <i>et al.</i> , 2002).....	39
Figura 2.20 – Termogravimetria isotérmica (Mothé, 2009).....	41
Figura 2.21 – Termogravimetria semi-isotérmica (Mothé, 2009).....	41
Figura 2.22 – Termogravimetria convencional ou dinâmica (Mothé, 2009).....	41
Figura 2.23 – Representação do escoamento de um fluido Newtoniano (DNER, 1996).....	43
Figura 2.24 – Esquema de funcionamento do viscosímetro Brookfield® (Rhode, 2007).....	44
Figura 2.25 – Reômetro de Cisalhamento Dinâmico (DSR) (Rohde, 2007).....	44
Figura 2.26 – Ângulo de fase e módulo complexo (Rohde, 2007).....	45
Figura 2.27 – Exemplos de resultados de ângulo de fase para dois tipos de CAP (Bernucci <i>et al.</i> , 2007).....	45
Figura 2.28 – Exemplo de representação de uma curva mestra (Alencar, 2009).....	46
Figura 2.29 – Transporte de curvas para construção da curva mestra (Chompoorat e Likitlersuang, 2009).....	47
Figura 2.30 – Razão entre a Resistência à Tração (RRT) para CPs condicionados e não condicionados conforme AASHTO T283/99 (Solaimanian <i>et al.</i> , 2003).....	50
Figura 2.31 – Simulador de tráfego de laboratório Hamburg (Moura, 2010).....	53
Figura 2.32 – Resultados do ensaio com o simulador de tráfego de laboratório Hamburg (Solaimanian <i>et al.</i> , 2003).....	54
Figura 2.33 – Equipamento de abrasão Los Angeles utilizado para o ensaio de desgaste Cântabro.....	56
Figura 2.34 – Equipamento utilizado para ensaio de MR em misturas asfálticas.....	58
Figura 2.35 – Sistema dinâmico para obtenção da energia de superfície de CAPs (Zollinger, 2005).....	60
Figura 2.36 – Representação esquemática do método das Placas de Wilhelmy (Arambula, 2007).....	61
Figura 2.37 – Dispositivo de Absorção Universal (USD) (Zollinger, 2005).....	62
Figura 2.38 – Gráficos plotados através do USD: (a) pressão de vapor versus tempo, (b) massa adsorvida de solvente versus tempo e (c) massa típica de solvente adsorvida versus isoterma de pressão de vapor (Zollinger, 2005). .....	62
Figura 2.39 – Representação esquemática do procedimento experimental em um microcalorímetro (Vasconcelos <i>et al.</i> , 2008).....	64
Figura 3.1 – LCC técnico proveniente da fábrica de castanha Iracema Ltda.....	68
Figura 3.2 – (a) Localização da pedreira Itaitinga (MFT), (b) Vista da pedreira e (c) Coleta de agregados.....	70
Figura 3.3 – Misturadores: (a) IKA® RW20 e (b) Silverson® L4R utilizados neste estudo.....	71

Figura 3.4 – Espectrômetro FTIR Shimadzu® modelo FTIR – 8300 usado neste estudo.....	72
Figura 3.5 – Sistema Shimadzu® TGA-50 utilizado neste estudo.....	72
Figura 3.6 – Sistema Shimadzu® DSC-50 utilizado neste estudo .....	73
Figura 3.7 – Estufa RTFOT utilizada neste estudo .....	73
Figura 3.8 – Viscosímetro Brookfield® modelo DVII+ utilizado neste estudo.....	74
Figura 3.9 – Reômetro de Cisalhamento Dinâmico (DSR) TA® AR 2000 utilizado neste estudo .....	75
Figura 3.10 – Reômetro de Fluência em Viga (BBR) CANON® utilizado neste estudo.....	76
Figura 3.11 – Espectrômetro de fluorescência de Raio-X do laboratório de Física da UFC utilizado neste estudo.....	76
Figura 3.12 – Etapas de utilização do AIMS neste estudo (PINE, 2010).....	78
Figura 3.13 – Distribuição granulométrica das misturas asfálticas .....	79
Figura 3.14 – Compactador Giratório Superpave (CGS) utilizado neste estudo.....	81
Figura 3.15 – Procedimento para compactação das amostras pelo método Superpave .....	82
Figura 3.16 – Passos referentes ao ensaio de sensibilidade à ação deletéria da água conforme procedimento descrito na AASHTO T 283/99.....	84
Figura 3.17 – (a) Equipamento utilizado para o ensaio de MR deste estudo, (b) Sistema de aquisição de dados.....	86
Figura 4.1 – Curvas termogravimétricas das amostras de: (a) CAP convencional e (b) CAP + 2% LCC em atmosfera oxidativa (O <sub>2</sub> ) e atmosfera inerte (Argônio). Taxa de aquecimento: 10°C/min. Fluxo do gás: 50 mL/min.....	88
Figura 4.2 – Comparação entre curvas termogravimétricas das amostras de: (i) CAP convencional e (ii) CAP + 2% de LCC em atmosfera oxidativa (O <sub>2</sub> ) e atmosfera inerte (Argônio). Taxa de aquecimento: 10°C/min. Fluxo do gás: 50 mL/min. ....	88
Figura 4.3 – Curva de DSC para as amostras de CAP convencional e CAP + 2% LCC. Taxa de aquecimento: 10°C/min. Fluxo de Nitrogênio: 50mL/min. ....	89
Figura 4.4 – Espectro na região do infravermelho para o LCC técnico deste estudo ....	90
Figura 4.5 – Espectro na região do infravermelho para o CAP convencional e para o CAP + 2% LCC deste estudo .....	91
Figura 4.6 – Viscosidade em função da temperatura para CAP convencional e CAP modificado com diferentes percentuais de LCC deste estudo.....	92
Figura 4.7 – Determinação da TUC para amostra de CAP convencional .....	93
Figura 4.8 – Determinação da TUC para a amostra de CAP + 0,5% LCC .....	94
Figura 4.9 – Determinação da TUC para a amostra de CAP + 1,0% LCC .....	94
Figura 4.10 – Determinação da TUC para a amostra de CAP + 1,5% LCC .....	94
Figura 4.11 – Determinação da TUC para a amostra de CAP + 2,0% LCC .....	94



Figura 4.12 – Curva mestra ( $G^*$ ) para o CAP convencional e para o CAP + 2% LCC deste estudo .....	98
Figura 4.13 – Curva mestra de tan (delta) para o CAP convencional e para o CAP + 2% LCC deste estudo .....	99
Figura 4.14 – Curva mestra ( $G^*$ ) para o CAP convencional e para o CAP + 2% LCC deste estudo após RTFOT .....	100
Figura 4.15 – Curva mestra de tan (delta) para o CAP convencional e para o CAP + 2% LCC, após RTFOT .....	101
Figura 4.16 – Resultados do parâmetro de angularidade dos agregados deste estudo ..	105
Figura 4.17 – Resultados do parâmetro de esfericidade dos agregados deste estudo ...	106
Figura 4.18 – Resultados do parâmetro de textura dos agregados deste estudo.....	107
Figura 4.19 – Exemplo de imagens analisadas das misturas deste estudo .....	108
Figura 4.20 – Resultados do percentual médio de CAP deslocado das misturas asfálticas analisadas após a utilização do ensaio <i>Lottman</i> modificado .....	109
Figura 4.21 – Fluxograma do ensaio <i>Lottman</i> modificado.....	111
Figura 4.22 – Relação entre a Resistência à Tração (RRT) para as misturas asfálticas .....	112
Figura 4.23 – Representação esquemática para o cálculo da faixa de variação de RRT .....	115
Figura 4.24 – Relação entre o Módulo de Resiliência (RMR) para as misturas asfálticas deste estudo.....	116
Figura 4.25 – Relação MR/RT .....	119
Figura 4.26 – Representação esquemática para o cálculo da faixa de variação de MR/RT.....	120
Figura 4.27 – Desgaste médio avaliado através do ensaio Cântabro para as misturas asfálticas .....	121

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1 – Classificação geral – extensão total (CNT, 2011) .....	6
Tabela 1.2 – Situação das rodovias pavimentadas no Brasil (CNT, 2011) .....	7
Tabela 1.3 – Investimentos em estradas (Adaptado de DNIT, 2009).....	9
Tabela 2.1 – Fatores que influenciam o dano por umidade em misturas asfálticas (Adaptado de Arambula, 2007) .....	13
Tabela 2.2 – Relação entre as propriedades mineralógicas do agregado com relação à resistência ao dano por umidade (Hanz <i>et al.</i> , 2007).....	26
Tabela 2.3 – Exportações de LCC relativas ao ano de 2010 (Sindicaju, 2011) .....	30
Tabela 2.4 – Composição dos componentes fenólicos do LCC natural e técnico (Mazzeto e Lomonaco, 2009).....	31
Tabela 2.5 – Procedimentos relativos aos ensaios de avaliação do dano por umidade (Gouveia <i>et al.</i> , 2004).....	52
Tabela 2.6 – Solução de carbonato de sódio para ensaio de adesividade por fervura (Adaptado de DNER-ME 79/1994).....	55
Tabela 3.1 – Quantidade de CPs por ensaio deste estudo .....	67
Tabela 3.2 – Características do CAP 50/70 cedidas pela Lubnor, conforme ensaios da especificação ANP realizados na própria refinaria.....	68
Tabela 3.3 – Propriedades físico-químicas do cardanol (Dantas, 2000) .....	69
Tabela 3.4 – Composição química da cal hidratada (Fonte: Carbomil S/A).....	69
Tabela 3.5 – Série de peneiras adotadas pelo AIMS .....	77
Tabela 3.6 – Granulometria dos agregados utilizados nas misturas.....	79
Tabela 4.1 – Eventos referentes à decomposição das amostras de CAP em atmosfera oxidativa (O <sub>2</sub> ) e atmosfera inerte (argônio) .....	89
Tabela 4.2 – Atribuições das bandas obtidas nos espectros FTIR do LCC deste estudo.....	90
Tabela 4.3 – Atribuições das bandas obtidas nos espectros FTIR do CAP convencional e do CAP + 2% LCC deste estudo .....	91
Tabela 4.4 – Mudanças na viscosidade após envelhecimento RTFOT para o CAP convencional e CAP + 2% LCC.....	93
Tabela 4.5 – Valores das TUCs para os diferentes CAPs deste estudo através da CLVT.....	95
Tabela 4.6 – Valores das TUCs para os diferentes CAPs, obtidos conforme o método Casola .....	95
Tabela 4.7 – Classificação das amostras de CAP convencional e CAP + 2% LCC por grau de desempenho (PG) .....	97
Tabela 4.8 – Caracterização dos agregados deste estudo .....	102
Tabela 4.9 – Caracterização química dos agregados.....	103

Tabela 4.10 – Resumo das análises de diferentes parâmetros de forma obtidos através do AIMS para caracterização dos agregados deste estudo.....	104
Tabela 4.11 – Parâmetros de dosagem das misturas asfálticas.....	110
Tabela 4.12 – Resultados do ensaio <i>Lottman</i> modificado .....	112
Tabela 4.13 – Resultados das faixas de variação dos resultados do ensaio <i>Lottman</i> modificado das amostras deste estudo .....	115
Tabela 4.14 – Resultados do ensaio de MR das amostras deste estudo .....	116
Tabela 4.15 – Resultados das faixas de variação de RMR deste estudo .....	118
Tabela 4.16 – Resultados de MR/RT .....	119
Tabela 4.17 – Resultados das faixas de variação de MR/RT .....	120
Tabela 4.18 – Resultados do ensaio de desgaste Cântabro.....	121

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ACMODAS – *Asphalt Concrete Moisture Damage Analysis System*  
AFM – *Atomic Force Microscopy*  
AMA – Agente Melhorador de Adesividade  
AIMS – *Aggregate Imaging Measurement System*  
AASHTO – *American Association of State Highway and Transportation Officials*  
ASTM – *American Society for Testing and Materials*  
ATR – *Attenuated Total Reflectance*  
BBR – *Bending Beam Rheometer*  
CNSL – *Cashew Nut Shell Liquid*  
CA – Concreto Asfáltico  
CAP – Cimento Asfáltico de Petróleo  
CCP – Concreto de Cimento Portland  
CH – Cal Hidratada  
CP – Corpo de Prova  
CV – Coeficiente de Variação  
CIDE – Contribuição sobre Intervenção no Domínio Econômico  
CGS – Compactador Giratório Superpave  
CLVT – Curva Logarítmica de Viscosidade *versus* Temperatura  
Cond. – Condicionado  
CNT – Confederação Nacional dos Transportes  
DNER – Departamento Nacional de Estradas e Rodagem  
DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura do Transporte  
DSC – *Diferencial Scanning Calorimeter*  
DSR – Reômetro de Cisalhamento Dinâmico  
EVA – Etileno Acetato de Vinila  
EVAR – Resíduo de Copolímero de Etileno e Acetato de Vinila  
FC – Frações Cristalizáveis  
FTIR – *Fourier Transform Infrared*  
IPEA – Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada  
IE – Índice de Envelhecimento  
IPR – Instituto de Pesquisas Rodoviárias  
IV – Infravermelho

CAP + 2% LCC – Ligante Asfáltico Modificado com 2% de LCC

CAP + 4% EVA – Ligante Modificado com 4% de EVA

CAP + 4% EVA + 2% LCC – Ligante Asfáltico Modificado com 4% de EVA e 2% de LCC

CAP + 3% SBS – Ligante Asfáltico Modificado com 3% de SBS

CAP + 4% SBS + 1% LCC – Ligante Asfáltico Modificado com 4% de SBS e 1% de LCC

CAP + 4,5% SBS + 1% LCC – Ligante Asfáltico Modificado com 4,5% de SBS e 1% de LCC

LCC – Líquido da Castanha de Caju

LMP – Laboratório de Mecânica dos Pavimentos

LVDT – *Linear Variable Differential Transformer*

Lubnor – Lubrificantes e Derivados de Petróleo do Nordeste Ltda – Limitada

MEF – Método dos Elementos Finitos

MR – Módulo de Resiliência

Não Cond. – Não Condicionado

PAC – Programa de Aceleração do Crescimento

PAV – Vaso de Envelhecimento sob Pressão

PDI – Processamento Digital de Imagens

PG – *Performance Grade*

PIB – Produto Interno Bruto

PNLT – Plano Nacional de Logística e Transporte

PNV – Plano Nacional de Viação

PPA – Ácido Polifosfórico

PSTT – Princípio da Superposição Tempo-Temperatura

RBV – Relação Betume/Vazios

RMR – Relação entre o Módulo de Resiliência para Corpos de Prova Condicionados e Não Condicionados

RPM – Rotações por Minuto

RRT – Relação entre a Resistência à Tração para Corpos de Prova Condicionados e Não Condicionados

RTFOT – *Rolling Thin Film Oven Test*

SARA – Saturados, Aromáticos, Resinas e Asfaltenos

SBS – Estireno-Butadieno-Estireno  
SEM – *Scanning Eletronic Microscopy*  
SFM – *Scanning Force Microscopy*  
Superpave – *Superior Performing Asphalt Pavements*  
TUC – Temperatura de Usinagem e Compactação  
TGA – Análise Termogravimétrica  
 $T_A$  – Temperatura da Amostra  
 $T_C$  – Temperatura de Cristalização  
 $T_{oxid}$  – Temperatura de Oxidação  
 $T_{d_{máx}}$  – Temperatura de Decomposição Máxima  
 $T_g$  – *Glass Transition*  
TDM – *Tecnologia de Materiales*  
TGA – Termogravimetria  
 $T_m$  – Temperatura de Fusão  
 $T_R$  – Temperatura de Referência  
UFC – Universidade Federal do Ceará  
USD – *Universal Sorption Device*  
VAM – Vazios do Agregado Mineral  
VCB – Vazios com Betume  
 $V_v$  – Volume de Vazios  
WP – *Wilhelmy Plate*  
ZR – Zona de Restrição

## LISTA DE SÍMBOLOS

- A – Área da Placa de Vidro  
A – Desgaste da Mistura Asfáltica  
CaO – Óxido de Cálcio  
CaCO<sub>3</sub> – Carbonato de Cálcio  
Ca(OH)<sub>2</sub> – Hidróxido de Cálcio  
Ca<sup>2+</sup> – Íons Cálcio (II)  
COOH – Grupamento Carboxila  
D – Distância  
D – Desgaste da Mistura Asfáltica  
F – Força Tangencial  
F – Carga Vertical Repetida  
G\* – Módulo Complexo  
G' – Módulo de Armazenamento ou Elástico  
G'' – Módulo de Perda ou Viscoso  
G\*/senδ – Parâmetro Indicativo de Deformação Permanente  
G\* × senδ – Parâmetro Indicativo de Vida de Fadiga  
G<sub>mm</sub> – Densidade Máxima Medida  
G<sub>mb</sub> – Densidade Máxima Aparente  
log – Logaritmo  
m – Logaritmo do Módulo de Relaxação  
MgO – Óxido de Magnésio  
Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> – Carbonato de Sódio  
N<sub>inicial</sub> – Esforço de Compactação Inicial  
N<sub>máximo</sub> – Esforço de Compactação de Projeto  
N<sub>projeto</sub> – Esforço de Compactação Máximo  
pH – Potencial Hidrogeniônico  
P – Peso Inicial  
P' – Peso do Corpo de Prova após o Ensaio de Desgaste Cântabro  
P<sub>cíclica</sub> – Carga Cíclica de Ensaio  
R<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – Resíduo de Ferro/Alumínio  
Si – Silício  
SiO<sub>2</sub> – Dióxido de Silício ou Sílica

SiOH – Hidróxido de Silício

S – Rigidez Estática

t – Altura do CP

w – Ângulo de Fase Correspondente à Temperatura de 86°C

$a_{[T]}$  – Fator de Deslocamento ou *shift factor*

$\Delta\gamma / \Delta t$  – Velocidade de Deformação

$\Delta T$  – Variação de Temperatura

$\Delta H_{ins}$  – Deslocamento Instantâneo Horizontal do Ciclo de Ensaio

$\Delta x$  – Variação de Espaço

$\tan \delta$  – Tangente de Delta

$\delta$  – Ângulo de Fase

$\sigma_t$  – Tensão de Tração

$\gamma$  – Energia Livre de Superfície Total

$\gamma^{LW}$  – Componente Apolar Lifshitz-van der Waals

$\gamma^{+}$  – Componente Ácido-Base de Lewis

$\gamma^{+}$  – Componente Ácido de Lewis

$\gamma^{-}$  – Componente Básico de Lewis

$\mu_{ins}$  – Coeficiente de Poisson Instantâneo ou Resiliente

$\eta$  – Viscosidade

$\tau$  – Tensão de Cisalhamento



# CAPÍTULO 1

## INTRODUÇÃO

### 1.1. Considerações Iniciais

O efeito deletério da água nos pavimentos vem se tornando um grave problema mundial sendo amplamente debatido em âmbito nacional e internacional durante as últimas décadas. Esse problema, na maioria das vezes associado a um alto volume de tráfego, condições climáticas e propriedades dos materiais, entre outros fatores, vem deteriorando pavimentos e elevando cada vez mais os custos referentes à manutenção e à reabilitação destas estruturas.

Pavimentos deteriorados ou de baixa serventia elevam despesas referentes aos veículos como aumento do consumo de combustíveis, custos com manutenção, etc. Um pavimento deteriorado também pode contribuir para o aumento das perdas de safra devido ao aumento do tempo no transporte, no número de acidentes, além de elevar os índices de poluentes que são lançados na atmosfera. Além desses fatores, uma infraestrutura rodoviária em condição deficiente dificulta a integração produtiva, econômica e social comprometendo assim o desenvolvimento do país (CNT, 2010).

Revestimentos asfálticos em geral são projetados para terem Volume de vazios ( $V_v$ ) inicial de 7%, com valor médio de 4% devido a densificação ocasionada pelo tráfego posteriormente, podendo chegar a ter 2% ao final da sua vida útil. A má adesividade entre o CAP e agregados, quando o  $V_v$  ou a umidade são excessivos, compromete o desempenho de misturas asfálticas a curto, médio e longo prazos (Moura, 2001; Furlan *et al.*, 2004). Moura (2001) afirma que esse fenômeno não acontece no revestimento inteiro, mas em áreas localizadas com vazios de ar saturados com água ou com vapor de água.

O efeito deletério da água em misturas asfálticas é definido por Kiggundu e Roberts (1988) como a deterioração progressiva funcional do pavimento ocasionada pela perda da ligação adesiva entre o CAP e a superfície do agregado e/ou a perda da resistência coesiva dentro do próprio filme de CAP principalmente pela ação da água. O fenômeno da adesão de um filme de CAP, sobre a superfície de um agregado mineral envolve o

desenvolvimento de interações eletrostáticas que dependem fundamentalmente da natureza química do par CAP/agregados (Liberatori e Constantino, 2006).

A formação dessas interações eletrostáticas na adesão está relacionada à natureza química das mesmas, pois o CAP é formado por compostos apolares (hidrocarbonetos) enquanto que a superfície dos agregados é de natureza polar podendo possuir cargas positivas ou negativas. Quanto maior a compatibilidade entre estes materiais, maior será a resistência do filme de CAP à ação deslocadora da água. Dependendo da natureza química entre os constituintes, podendo ocorrer deslocamento do filme de CAP caso não haja uma ligação química efetiva para melhorar essa interação, são utilizados aditivos ou Agentes Melhoradores de Adesividade (AMA) (Caro *et al.*, 2008a).

Com o objetivo de controlar o dano ocasionado pela água ao pavimento, muitos pesquisadores vêm utilizando aditivos que aumentam a compatibilidade química entre o CAP e o agregado. Tais aditivos são conhecidos na literatura por AMA sendo os DOPES, a cal virgem e a cal hidratada os agentes mais utilizados. A cal quando adicionada ao CAP reage com o agregado fortalecendo a ligação química entre estes materiais.

Os ensaios utilizados para avaliação do dano por umidade em misturas asfálticas são, de maneira geral, divididos em duas categorias: (i) ensaios realizados em misturas asfálticas soltas e (ii) ensaios realizados em misturas asfálticas compactadas. Contudo, estes ensaios são em sua grande maioria, empíricos e pouco correlacionados com a compatibilidade do par CAP/agregados (Solaimanian *et al.*, 2003).

O Líquido da Castanha de Caju (LCC) é constituído de uma fonte natural de compostos fenólicos de cadeia longa e insaturada sendo obtido durante o beneficiamento das castanhas de caju. O LCC também é utilizado na fabricação de produtos industriais importantes como o cimento, os vernizes e as tintas, além de ter importância fundamental para a indústria de polímeros. A proposta desta pesquisa é verificar o potencial do LCC como modificador de CAP já que o mesmo apresenta características surfactantes que podem contribuir potencialmente para melhorar a compatibilidade química entre CAP e agregados na presença da água.

## **1.2. Conceitos Básicos e Generalidades sobre a Pavimentação**

Os meios de transporte são de fundamental importância para o desenvolvimento de um país, pois é através dos mesmos que há deslocamentos de bens, de serviços e de pessoas para que a exportação possa acontecer. Ao mencionar meios de transportes, podem-se citar: (i) aéreo, (ii) fluvial, (iii) dutoviário, (iv) ferroviário, (v) hidrovial e (vi) rodoviário, sendo este último o meio de transporte mais utilizado no Brasil.

A construção de caminhos ou estradas surgiu da necessidade de deslocamentos de pessoas e mercadorias entre lugares. Utiliza-se o revestimento do leito, também denominado de pavimento, para ter condições de trafegabilidade em qualquer período do ano. A melhoria das condições das estradas se reflete diretamente na redução do número de acidentes rodoviários, na diminuição das perdas de safra pelo tempo excessivo no transporte, na redução do consumo de combustíveis, na redução do custo de manutenção, no aumento da vida útil dos veículos e em inúmeros outros fatores correlatos.

De acordo com o manual de pavimentação do DNIT (2006), “pavimento é a superestrutura constituída por um sistema de camadas de espessuras finitas, assentes sobre um semi espaço considerado teoricamente como infinito – camada final de terraplenagem ou terreno de fundação, a qual é designada de subleito”. Este é econômica e tecnicamente destinado a resistir e a distribuir ao subleito todos os esforços provenientes do tráfego de veículos e do clima, proporcionar conforto e segurança aos usuários além de economia, resistência ao desgaste (esforços horizontais), e aos riscos de derrapagem resultando numa superfície de rolamento de maior durabilidade.

Sendo o pavimento constituído de diversas camadas, é difícil chegar a um termo que defina toda a estrutura. Portanto, tradicionalmente este é classificado em dois tipos principais: (i) flexível e (ii) rígido (Figura 1.1). Os pavimentos flexíveis são caracterizados por revestimento com materiais asfálticos. Todas as camadas sofrem deformações elásticas e viscoelásticas sob o carregamento aplicado de maneira que as cargas são distribuídas em parcelas aproximadamente equivalentes entre as camadas onde, até certo limite, as deformações não levam ao rompimento (de Senço, 1997; Pinto e Preussler, 2002).

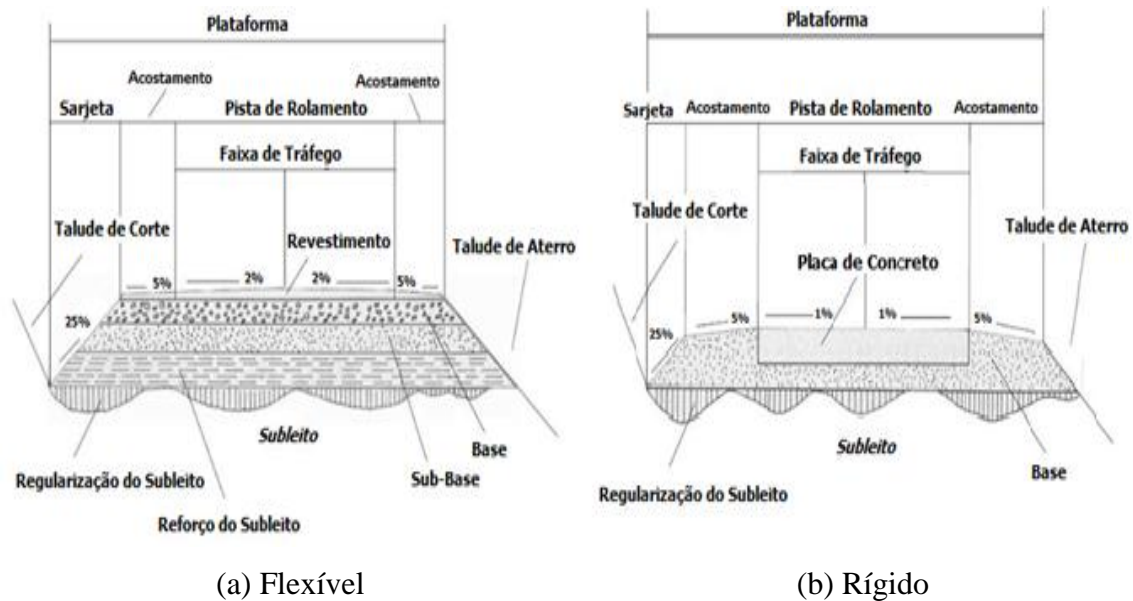


Figura 1.1 – Seção transversal típica de um pavimento: (a) Flexível e (b) Rígido (Menezes, 2003)

De acordo com DNER (1996), no aspecto geométrico, o pavimento flexível é constituído por: (i) revestimento, (ii) base e (iii) subbase. Do ponto de vista estrutural, é constituído por: (i) revestimento, (ii) base, (iii) subbase e (iv) reforço do subleito, sendo este último assente sobre o subleito (Figura 1.1a). Em seu dimensionamento, devido a razões técnico-econômicas, são fixadas especificações ou seja, características mínimas a serem obedecidas pelas diferentes camadas e, para cada uma destas características, escolhe-se a melhor solução técnico-econômica.

Os pavimentos rígidos são pouco deformáveis e praticamente absorvem a maior parte das tensões procedentes do carregamento aplicado pelo tráfego devido a maior rigidez em relação às camadas inferiores ou às subcamadas. Este apresenta em sua constituição uma placa de Concreto de Cimento Portland (CCP) com desempenho simultâneo de revestimento e de base (Figura 1.1b). A espessura da placa é fixada de acordo com a resistência à flexão das placas de concreto e das resistências das subcamadas (Bernucci *et al.*, 2007). Em seu dimensionamento, leva-se em consideração o módulo de reação do subleito e a tensão de tração na flexão da placa.

As cargas aplicadas por veículos sobre a superfície do pavimento são de natureza cíclica (repetitivas) e criam estados de tensões (verticais e horizontais) na estrutura que influenciarão no comportamento em campo de cada camada do pavimento. A diferença

fundamental entre os pavimentos rígidos e flexíveis consiste em como cada um destes tipos de pavimentos transfere essas cargas aplicadas para as subcamadas.

Constituindo-se de um maior número de camadas, os pavimentos flexíveis transferem as cargas para uma área menor do subleito exigindo material de base de melhor qualidade. Os pavimentos rígidos providenciam maior parte da capacidade de suporte estrutural devido ao elevado módulo de elasticidade do próprio CCP. A transferência da carga neste tipo de pavimento se distribui sobre uma área relativamente grande do subleito (Figura 1.2).

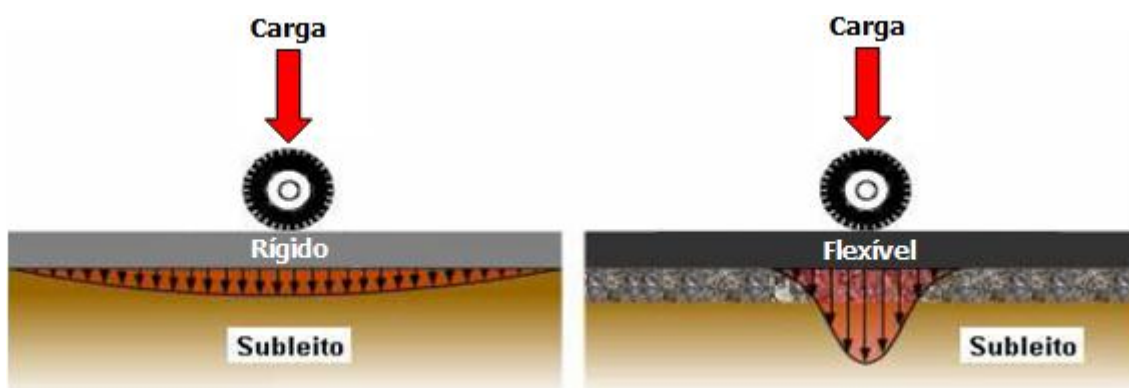


Figura 1.2 – Aplicação e transferência de cargas nos pavimentos rígidos e flexíveis (Specht, 2010)

### 1.3. A Malha Rodoviária Brasileira

As obras de pavimentação brasileiras segundo DNER (1996), cresceram notadamente após a criação do Instituto de Pesquisas Rodoviárias (IPR) em 1957, devido ao aumento nas pesquisas sobre materiais, procedimentos e métodos de ensaio. Um estudo desenvolvido pelo Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA) explica que a malha rodoviária brasileira cresceu em ritmo acelerado, em especial entre as décadas de 60 e 70, devido ao auxílio financeiro fornecido aos Estados e a ajuda do Plano Rodoviário Nacional. Durante a década de 80, houve uma desaceleração cujo término deu-se com a Constituição Federal de 1988 na qual houve a proibição da dependência de rendimentos oriundos de impostos a órgãos, fundos ou despesas predeterminadas. Desde então, a infraestrutura rodoviária nacional passou a depender quase exclusivamente de recursos provenientes da união. Com o início das concessões de rodovias à iniciativa privada na segunda metade da década de 90, novos recursos foram inseridos para que fossem atendidas às necessidades no setor rodoviário. Além disso, o

governo federal vem fazendo investimentos de longo prazo que acarretaram na criação de planos e programas como o Plano Nacional de Logística e Transportes (PNLT) e o Programa de Aceleração do Crescimento (PAC) (IPEA, 2011).

Atualmente, segundo o último Plano Nacional de Viação (PNV) do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT), verificou-se que o Brasil possui 212.738km correspondentes a rodovias pavimentadas, 1.368.226,8km correspondentes a rodovias não pavimentadas e 131.331,4km referentes a rodovias planejadas. Rodovias planejadas são vias inexistentes fisicamente nas quais estão previstos pontos de passagem que constituem uma diretriz designada a atender uma demanda potencial de tráfego. A extensão total da malha rodoviária brasileira, incluindo rodovias municipais, estaduais e federais, é de 1.712.296,2km (DNIT, 2010).

De acordo com a última pesquisa Confederação Nacional do Transporte (CNT) de rodovias (CNT, 2011), 92.747km da malha rodoviária do país foram avaliados com relação às seguintes características: (i) pavimento, (ii) sinalização, (iii) geometria da via e (iv) presença de pontos críticos, quando houver. A referente pesquisa designa de pontos críticos de engenharia de tráfego as seguintes situações: (i) curvas fechadas com superelevação inadequada, (ii) fluxo de veículos em sentido duplo, (iii) falta de passarelas, (iv) falta de faixas adicionais em aclives e declives e (v) falta de sinalização. Constatou-se, de acordo com o levantamento realizado, que 57,4% (53.226km) dos trechos analisados são classificados como: (i) regular (30,5%), (ii) ruim (18,1%) e (iii) péssimo (8,8%). Os 39.521km (42,6%) restantes são classificados como ótimo e bom (Tabela 1.1).

Tabela 1.1 – Classificação geral – extensão total (CNT, 2011)

Estado Geral	Extensão Total	
	km	%
Ótimo	11.743	12,6
Bom	27.778	30,0
Regular	28.327	30,5
Ruim	16.751	18,1
Péssimo	8.148	8,8
TOTAL	92.747	100,0

Vale ressaltar que, houve uma melhoria observada em relação a estudos anteriores e que esses esforços, entretanto, deveriam ser ampliados para trazer mais benefícios para o

país. Verifica-se que, entre 2005 e 2011, houve um aumento de 14,6% na quantidade de rodovias classificadas como ótimas ou boas e que houve uma redução de 13,3% na quantidade de rodovias classificadas como ruins ou péssimas (Tabela 1.2). Esse resultado é importante para a sociedade brasileira, pois uma infraestrutura rodoviária em situação adequada promove a integração econômica entre regiões além de trazer benefícios para a sociedade (CNT, 2011).

Tabela 1.2 – Situação das rodovias pavimentadas no Brasil (CNT, 2011)

Ano	km avaliados	Ótimo/Bom (%)	Regular (%)	Ruim/Péssimo (%)
2005	81.944	28,0	31,8	40,2
2007	87.592	26,1	40,8	33,1
2009	89.552	31,0	45,0	24,0
2010	90.945	41,2	33,4	25,4
2011	92.747	42,6	30,5	26,9

#### 1.4. Investimentos Federais em Rodovias

Nos últimos anos, os investimentos públicos e privados em rodovias vêm aumentando, no entanto tais recursos não são suficientes para garantir uma malha rodoviária de boa qualidade, além das necessidades de ampliação e de adequação da mesma. O levantamento feito pelo IPEA (2010) também mostra que, para solucionar os problemas de todas as rodovias brasileiras, seria necessário uma demanda de investimentos em torno de R\$183,5 bilhões ao longo de cinco anos. Além desse montante, seriam necessários mais R\$ 160,8 bilhões que corresponderiam a investimentos da ordem de R\$ 32 bilhões por ano para ampliar a malha rodoviária. Contudo, são necessários mais de 55% dos investimentos para suprimir as restrições referentes à infraestrutura rodoviária nacional (IPEA, 2011).

De acordo com o estudo do IPEA (2011), o Brasil devia investir no mínimo, 3,4% do PIB para que possa se igualar a países concorrentes como China, Índia e Chile. Vale salientar que esse percentual corresponderia a investimentos da ordem de R\$ 125 bilhões por ano. Entretanto, em 2010, o Brasil investiu apenas R\$ 23,4 bilhões que corresponde a 0,65% do PIB.

O crescimento nos investimentos feitos pelo poder público, deve-se a empenhos como a criação em 2001 da Contribuição sobre Intervenção no Domínio Econômico (CIDE-Combustíveis) que teve como principal objetivo financiar programas de infraestrutura

de transportes. A Figura 1.3 mostra o valor total de arrecadação desse imposto entre 2002 e 2008 na qual percebe-se, com exceção de 2008 quando o governo teve que reduzir a alíquota em resposta à crise econômica internacional, que os valores arrecadados com a CIDE-Combustíveis foram crescentes. Entretanto, mesmo com tal objetivo, seu destino tem sido a amortização de dívidas, o pagamento de funcionários e o custeio da administração federal (IPEA, 2010).

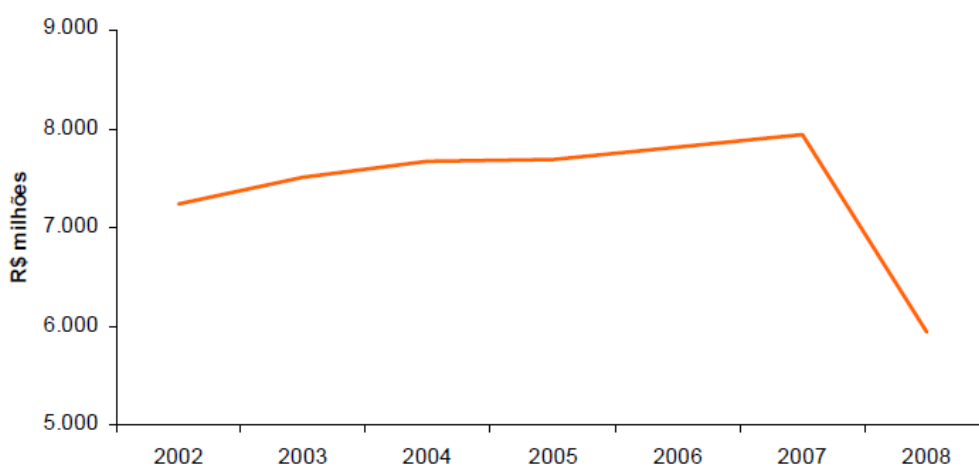


Figura 1.3 – Arrecadação CIDE – combustíveis entre 2002 e 2008 (IPEA, 2010)

É um fato reconhecido, de acordo com os levantamentos feitos pela CNT e pelo IPEA, que a condição da malha rodoviária brasileira é deficiente. Apesar do aumento dos investimentos em transportes rodoviários provenientes do governo federal e das concessionárias, via recursos próprios ou provenientes da CIDE, ainda há muito a ser feito (CNT, 2011; IPEA, 2010).

### 1.5. A Malha Rodoviária Cearense

Conforme o último PNV do DNIT (2010), o Ceará possui cerca de 8.374km de rodovias pavimentadas, 43.413,6km de rodovias não pavimentadas, 1.588,9km de rodovias planejadas. A extensão total da malha rodoviária cearense, incluindo rodovias municipais, estaduais e federais, é de 53.376,6km. O último relatório gerencial feito pela CNT mostra que, 3.269km (ou seja, 41% das rodovias federais e estaduais) foram avaliados com relação às seguintes características: pavimento, sinalização e geometria da via. Os dados referentes a esse levantamento são mostrados na Figura 1.4. Vale salientar que a malha rodoviária cearense está distribuída em dez rodovias, são estas as BRs: 020, 116, 122, 222, 226, 230, 304, 402, 403 e 404.



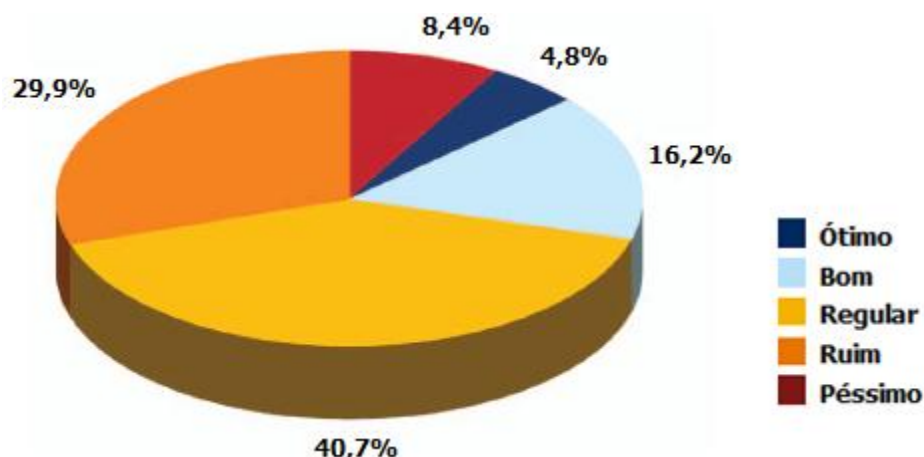


Figura 1.4 – Classificação geral – CE (CNT, 2011)

De acordo com os dados apresentados na Figura 1.4, percebe-se que a situação da malha rodoviária cearense é bem pior se comparada com os dados da classificação geral apresentados na Tabela 1.1. Tal fato pode ser verificado através do PNV de 2009 do DNIT, no qual o estado do Ceará foi o Estado da região Nordeste com o segundo pior volume de investimentos em rodovias federais (Tabela 1.3). Esses dados consideram apenas o que já fora efetivamente pago, sem levar em conta comprometimentos em ações como ampliação e restauração de estradas. Não estão também inclusos recursos designados ao custeio de máquinas.

Tabela 1.3 – Investimentos em estradas (Adaptado de DNIT, 2009)

UF	Malha Viária (km)	Investimentos (R\$)	R\$ / km
Pernambuco	2.838,1	254.900.000	89.813,6
Bahia	11.235,8	176.500.000	15.708,7
Paraíba	1.668,5	131.400.000	78.753,4
Maranhão	4.335,7	89.000.000	20.527,3
Rio Grande do Norte	1.792,0	82.200.000	45.870,5
Alagoas	915,3	62.600.000	68.392,9
Piauí	4.409,4	54.100.000	12.269,2
Ceará	3.588,6	49.050.000	13.668,3
Sergipe	411,8	19.600.000	47.595,9

Mesmo possuindo a quarta maior malha viária do Nordeste, foram gastos apenas aproximadamente R\$49 milhões provenientes do governo federal para a melhoria da infraestrutura da malha viária cearense. Estados como Pernambuco e Paraíba, que

possuem menores malhas viárias em relação ao Ceará, foram beneficiados com investimentos acima de 200 e 100 milhões, respectivamente. A infraestrutura de transportes do estado do Ceará ainda está distante de ser considerada preparada para os desafios essenciais à globalização da economia mundial, que exige maior eficiência no transporte de cargas e de passageiros, de maneira a conseguir ganhos efetivos de bem estar social e econômico para a população.

## **1.6. Objetivos da Pesquisa**

O objetivo geral desta pesquisa é:

- Verificar o potencial do Líquido da Castanha de Caju (LCC) como modificador do ligante asfáltico com relação à resistência ao dano por umidade induzida em misturas asfálticas.

Os objetivos específicos desta pesquisa são:

- Avaliar a influência da adição do LCC em CAP nas propriedades reológicas e empíricas do mesmo e nos parâmetros volumétricos e mecânicos de misturas asfálticas com utilização deste material;
- Avaliar o efeito de diferentes métodos de condicionamento de temperatura para o ensaio *Lottman* modificado e de parâmetros volumétricos de misturas asfálticas na resistência ao dano por umidade induzida de diferentes misturas asfálticas;
- Comparar a resistência ao dano por umidade de diferentes misturas asfálticas contendo: (i) CAP convencional, (ii) CAP modificado com 2% de LCC e (iii) CAP convencional com a utilização de cal como fíler.
- Verificar o potencial do Processamento Digital de Imagens (PDI) como ferramenta para a análise qualitativa da resistência ao dano por umidade induzida em diferentes misturas asfálticas.

## **1.7. Estrutura do Trabalho**

O presente trabalho está assim organizado:

- O Capítulo 1 é este capítulo de introdução contendo conceitos, generalidades, entre outras considerações sobre pavimentação. Informações referentes às

malhas rodoviárias brasileira e cearense, além dos objetivos da pesquisa são mostrados nesse capítulo;

- O Capítulo 2 apresenta a revisão bibliográfica sobre dano por umidade em misturas asfálticas e os principais mecanismos relacionados ao deslocamento da película de CAP. São abordados também neste capítulo alguns ensaios utilizados para a caracterização da resistência ao dano por umidade e discussões a respeito do LCC (principais aplicações, além de uma revisão cronológica dos estudos que já foram feitos utilizando este material como modificador de CAPs);
- O Capítulo 3 trata da obtenção e da caracterização dos materiais utilizados na presente pesquisa. Neste capítulo também foi abordada a metodologia utilizada nesta pesquisa;
- O Capítulo 4 apresenta os resultados desta pesquisa e a análise dos mesmos;
- O Capítulo 5 traz as conclusões desta pesquisa e as recomendações para trabalhos futuros.

## CAPÍTULO 2

### REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 2.1. Dano por Umidade em Misturas Asfálticas

O efeito deletério da água em pavimentos asfálticos é um dos principais problemas que afeta rodovias no mundo. Conforme visto anteriormente, a precariedade da malha rodoviária reflete tal situação, uma vez que a presença da água agrava uma série de defeitos. A Figura 2.1 mostra alguns exemplos de defeitos em pavimentos: (i) corrugações, costeletas ou costelas de vaca, (ii) panelas ou buracos, (iii) trincas transversais, (iv) trincas longitudinais, (v) trincas em forma de “couro de jacaré”, (vi) bombeamentos de finos, (vii) afundamentos e (viii) deformação permanente. Arambula (2007) afirma que as corrugações e o bombeamento de finos são defeitos relacionados à presença da água na estrutura do revestimento. Os afundamentos, panelas, deformação permanente e as trincas (transversais, longitudinais e em forma de “couro de jacaré”) são defeitos que, mesmo não iniciados pela incidência da água, se agravam em extensão e em severidade devido à presença da água e da umidade.



Afundamentos



Bombeamento de finos



Corrugações



Deformação permanente



Panelas



Trincas longitudinais



Trincas transversais



Trincas em forma de “couro de jacaré”

Figura 2.1 – Principais defeitos agravados pela água em pavimentos (Arambula, 2007; Bernucci *et al.*, 2007)

De acordo com Solaimanian *et al.* (2003), os defeitos relacionados ao dano por umidade são ocasionados por diversos fatores e a presença da água acelera a formação e a variedade dos mesmos. Caro *et al.* (2008a) afirmaram que a deterioração da estrutura do pavimento devido a ação da água dificilmente acontece de maneira isolada. Defeitos clássicos, como deformação permanente e trincamento por fadiga são frequentemente agravados pela presença da água na infraestrutura do pavimento. Gorkem e Sengoz (2009) afirmaram também que os maiores danos ocorrem particularmente quando há inverno combinado com alto volume de tráfego.

Arambula (2007) dividiu os principais defeitos relacionados ao dano por umidade em dois tipos: (i) internos e (ii) externos. Os respectivos fatores e variáveis destes dois tipos de defeitos são mostrados na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Fatores que influenciam o dano por umidade em misturas asfálticas  
(Adaptado de Arambula, 2007)

<b>Tipo</b>	<b>Fator</b>	<b>Variável</b>	
Interno	Agregado	Forma	
		Textura	
		Angularidade	
		Porosidade	
		Área superficial	
		Limpeza	
Ligante Asfáltico	Ligante Asfáltico	Teor de umidade	
		Composição mineralógica	
		Energia de superfície	
		Energia de superfície	
Volume de vazios	Volume de vazios	Espessura do filme de ligante	
		Viscosidade	
		Composição química	
Externo	Produção	Energia de superfície	
		Percentual	
		Tamanho	
	Construção	Construção	Conectividade
			Permeabilidade
			Segregação física
	Ambiental	Ambiental	Segregação física
			Agregados livres de umidade
			Escorrimento do CAP
	Tráfego	Tráfego	Segregação térmica
			Equipamentos utilizados
			Projeto de mistura
Tráfego	Tráfego	Temperatura	
		Ciclos de gelo-degelo	
		Nível do lençol freático (saturação)	
Tráfego	Tráfego	pH da água	
		Magnitude do carregamento	
Tráfego	Tráfego	Número de repetições do eixo padrão	

## 2.2. Origem da Água no Pavimento

A presença da água no pavimento sempre foi motivo de preocupação para construtores e projetistas desde a antiguidade. Tratando-se de uma estrutura que geralmente apresenta grande área superficial exposta ao tráfego e ao intemperismo, o pavimento, seja ele rígido ou flexível, é suscetível à ação da água de diversas maneiras. A presença da água no pavimento não apenas influencia o comportamento do mesmo, como também afeta o desempenho dos materiais de cada camada além de ter influência negativa sobre o índice de serventia. Vale ressaltar, porém que, os efeitos da presença da água no pavimento não surgem de maneira imediata.

Pereira (2003) estabeleceu diferentes formas de infiltração da água no pavimento:

- Através de superfícies permeáveis, fissuras, trincas ou juntas;
- Lateralmente por meio de águas acumuladas em canteiros, sarjetas não estanques ou acostamentos não revestidos;
- Por sucção capilar;
- Por meio de fluxos d'água ascendentes, oriundos de nascentes, enchentes de rios e de lençol d'água elevado;
- Através da condensação do vapor d'água resultante das variações de pressão atmosférica e da temperatura.

A Figura 2.2 ilustra as diferentes maneiras de infiltração da água em um pavimento segundo o esquema apresentado em Azevedo (2007).



Figura 2.2 – Fontes de água na estrutura do pavimento (Azevedo, 2007)

A precipitação pluviométrica constitui a maior fonte de águas que penetram na estrutura do pavimento tanto pela superfície quanto pelas laterais e pelos acostamentos. Devido às mudanças nas condições ambientais durante o ano, acredita-se que o efeito deletério da água num pavimento siga uma tendência periódica, com a intensidade de dano e de perda de serventia acontecendo de forma mais acentuada em períodos úmidos (Silva, 2005).

As precipitações que, geralmente, apresentam curto período de tempo são aquelas com maior intensidade e, mesmo com o abastecimento de água abundante sobre o pavimento, grande parte escoar pela superfície do revestimento devido à baixa permeabilidade do mesmo. As precipitações de menor intensidade ocasionam maior dano ao pavimento por ocorrerem em períodos mais longos, fornecendo quantidade de água constante para infiltração. Dessa forma, facilitam a penetração de maior volume de água, ainda que a permeabilidade da estrutura do pavimento seja baixa (Pereira, 2003). Azevedo (2007) cita que a água também pode infiltrar-se pelas laterais de um pavimento quando são utilizadas camadas granulares ou dispositivos de drenagem superficial ou subsuperficial impróprios.

O efeito deletério da água no pavimento por capilaridade é atribuído a fluxos d'água ascendentes devido à elevação do nível do lençol freático. A água movimenta-se através de forças capilares proporcionadas pelas diferentes conexões entre os vazios existentes no solo. Essas forças capilares são atribuídas à ação da tensão superficial nos vazios acarretando o transporte da água entre locais com diferentes teores de umidade (Figura 2.3). Portanto, a ação da capilaridade acontece de um meio com teor de umidade maior para outro com teor de umidade menor (Azevedo, 2007). Moulton (1980) afirmou que a água oriunda da ascensão capilar não pode ser drenada pela ação da gravidade. Este autor recomenda, para o controle da umidade capilar, a implantação de uma camada de bloqueio ou uma camada drenante para a intercepção do fluxo de água.

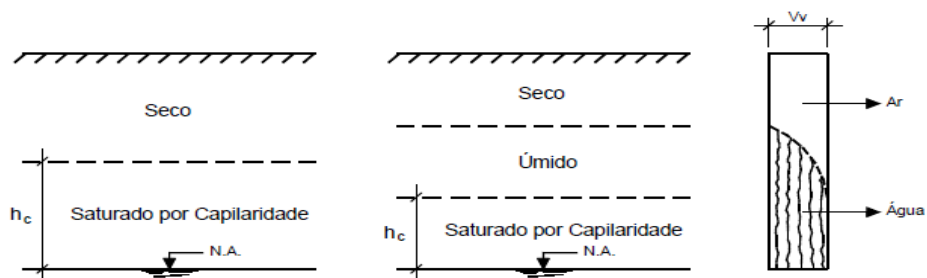


Figura 2.3 – Representação esquemática da ascensão capilar (Pereira, 2003)

A infiltração por meio de fluxos d'água ascendentes acontece de forma sazonal ou contínua e, para ambos os casos, diretamente influenciada por precipitações recentes acontecidas na região. Pereira (2003) afirma que, o tratamento destes fluxos deve ser executado de maneira pontual para melhor garantir que a estrutura do pavimento será preservada. Este autor também recomenda que cuidados devem ser implementados em obras durante a época de seca, já que algumas fontes podem encontrar-se temporariamente sem fluxo d'água. No entanto, com o início da estação chuvosa, os fluxos d'água poderão regressar a uma posição mais elevada e as consequências disso são danos severos à estrutura do pavimento.

Moulton (1980) considerou como desprezível a quantidade de água oriunda da condensação de vapores dispersos na estrutura interna do pavimento em relação às outras fontes de infiltração. As fontes de infiltração, já apresentadas anteriormente, proporcionam maior quantidade de água gerando águas livres na estrutura do pavimento. O termo água livre refere-se a variação ou ao excesso do teor de umidade. Esse tipo de água tem maior mobilidade dentro do pavimento e é responsável pelo desgaste do pavimento devido à variação do teor de umidade.

### 2.3. Mecanismos Responsáveis pela Perda da Adesividade a Nível Micro

O dano por umidade é definido como o fenômeno relacionado à perda de força e de durabilidade nas misturas asfálticas pela ação da água. Ele ocorre de duas formas: (i) falha na adesão (entre CAP e agregados) e (ii) falha na coesão (dentro do próprio filme de CAP) (Figura 2.4) (Kiggundu e Roberts, 1988). Kiggundu e Roberts (1988) e Hanz *et al.* (2007) ressaltaram a complexidade deste problema e afirmaram que o efeito deletério da água não pode ser atribuído apenas a uma única propriedade do material ou a um mecanismo físico.

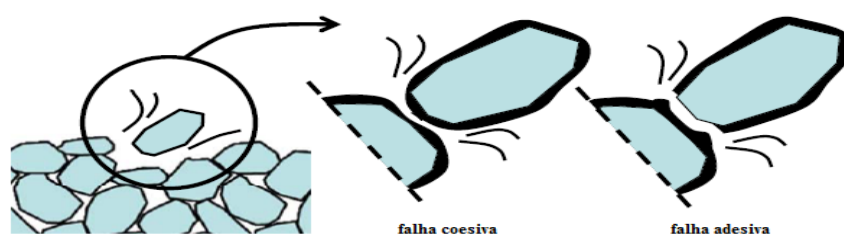


Figura 2.4 – Falha coesiva *versus* falha adesiva na mistura asfáltica (Kringos, 2007)



A compatibilidade química entre o par CAP/agregados a nível molecular é um fenômeno ainda pouco compreendido. A causa da redução da coesão devido à interação da água com o CAP ocasiona a redução da rigidez e da resistência da mistura asfáltica. Foram encontradas na literatura quatro teorias que tentam explicar a adesão entre CAP e agregados à nível micro que, inclusive, podem ocorrer simultaneamente: (a) reação química, (b) energia de superfície, (c) orientação molecular e (d) adesão mecânica ou intertravamento (Kiggundu e Roberts, 1988; Moura, 2001; Johnson e Freeman, 2002; Solaimanian *et al.*, 2003; Furlan, 2006; Zaniewski e Viswanathan, 2006).

### ***2.3.1. Reação Química***

A adesão à longo prazo entre o CAP e os agregados depende da reação química entre os mesmos. Os componentes ácidos do CAP reagem com os componentes básicos dos agregados produzindo sais insolúveis em água que resistem à perda de adesão. Entretanto, a reação entre agregados ácidos e CAP não é forte se comparada à reação com os agregados básicos. Devido a isso, se observa, com certa frequência, baixa adesividade em misturas asfálticas compostas por agregados ácidos (quartzo e granito, por exemplo). Maiores detalhes envolvendo a reação química entre CAP e agregados serão vistos adiante no item 3.4.1 do próximo capítulo.

### ***2.3.2. Energia de Superfície***

A adesão é um fenômeno termodinâmico relacionado à energia de superfície dos materiais envolvidos (CAP, água e agregados). A energia de superfície (também designada de tensão superficial ou energia livre de superfície) de um material (seja ele sólido ou líquido) é definida como o trabalho necessário para criar uma nova unidade de área de superfície no vácuo. A energia de superfície pode ser descrita em termos de uma relativa molhabilidade da superfície do agregado pela água ou pelo CAP, sendo a água melhor agente umidificante devido à baixa viscosidade e à baixa tensão de superfície (Solaimanian *et al.*, 2003).

A energia de superfície total de qualquer material é baseada em três componentes: (i) apolar, também designado de Lifshitz-van der Waals, (ii) base de Lewis e (iii) ácido de Lewis. De acordo com a Equação 2.1, obtêm-se a energia livre de superfície total combinando-se esses três componentes (Bhasin, 2006).

$$\gamma = \gamma^{LW} + \gamma^{+-} = \gamma^{LW} + 2\sqrt{\gamma^+\gamma^-} \quad (2.1)$$

Onde:

$\gamma$  = energia livre de superfície total

$\gamma^{LW}$  = componente apolar Lifshitz-van der Waals

$\gamma^{+-}$  = componente ácido-base de Lewis

$\gamma^+$  = componente ácido de Lewis

$\gamma^-$  = componente básico de Lewis

A Equação 2.2 é aplicada para a determinação da adesão ( $W_{AB}$ ) entre dois tipos de materiais (A e B), em termos de suas energias de superfície (Bhasin, 2006):

$$W_{AB} = 2\sqrt{\gamma_A^{LW}\gamma_B^{LW}} + 2\sqrt{\gamma_A^+\gamma_B^-} + 2\sqrt{\gamma_A^-\gamma_B^+} \quad (2.2)$$

A habilidade de um líquido molhar a superfície de um sólido é um fator importante na determinação da compatibilidade entre CAP e agregados. Se as forças intermoleculares entre agregados e CAP forem mais fortes do que as forças existentes dentro do CAP, a molhabilidade entre os mesmos irá ocorrer. Uma maneira indireta de determinar a molhabilidade do CAP é determinar o ângulo de contato deste material com uma determinada superfície ou determinar a energia de superfície do agregado. Para a determinação da energia de superfície destes materiais, são utilizados alguns equipamentos como: (i) Placas de Wilhelmy, (ii) Dispositivo de Absorção Universal e (iii) Micro Calorímetro. Maiores detalhes a respeito dessas metodologias serão apresentados posteriormente nos itens de 2.11.1 a 2.11.3 deste capítulo.

### **2.3.3. Orientação Molecular**

A orientação molecular é um fenômeno associado à energia de superfície e acontece baseado no fato de que as moléculas de CAP alinham-se com as cargas da superfície dos agregados para satisfazer a capacidade máxima de demanda de energia de superfície total. As moléculas de água são bipolares e mais polares do que as moléculas do CAP. Conseqüentemente, as moléculas de água melhor satisfarão aos requisitos energéticos

da superfície do agregado. Isso justifica por que, em alguns casos, a afinidade entre dois materiais no estado seco pode ser diferente da afinidade dos mesmos no estado úmido.

#### **2.3.4. Adesão Mecânica**

A adesão mecânica é influenciada pelas propriedades dos agregados tais como: textura superficial, porosidade, absorção, área superficial e granulometria. Uma textura superficial rugosa deve promover um intertravamento entre a superfície dos agregados e o CAP. Se o agregado for muito poroso, ele irá absorver CAP suficiente para formar uma conexão mecânica. Por outro lado, se o agregado for muito poroso ele poderá absorver CAP em grandes quantidades e o filme de CAP se tornará fino facilitando a penetração de água. No entanto, um grau de absorção pode existir resultando em intertravamento mecânico e espessura de filme adequados, produzindo assim um potencial mínimo para prevenir o dano por umidade (Furlan *et al.*, 2004).

#### **2.4. Mecanismos Responsáveis pela Perda da Adesividade a Nível Macro**

A umidade enfraquece as misturas asfálticas de várias maneiras. Existem, no mínimo, cinco mecanismos diferentes que podem agir individualmente ou em conjunto e que levam ao dano por umidade: descolamento, deslocamento, emulsificação espontânea, ação da pressão neutra e lavagem hidráulica (Kiggundu e Roberts, 1988; Tarrer e Wagh, 1991; Moura, 2001; Johnson e Freeman, 2002; Solaimanian *et al.*, 2003; Zaniewski e Viswanathan, 2006; Arambula, 2007). Kiggundu e Roberts (1988) mencionaram que alguns destes mecanismos podem estar relacionados à falta de compatibilidade do par CAP/agregados: intemperismo, magnitude do carregamento e possibilidade de combinação de variáveis. Solaimanian *et al.* (2003) e Zaniewski e Viswanathan (2006) destacaram ainda mecanismos adicionais como a instabilidade do pH da água e os efeitos ambientais como sendo responsáveis pela instabilidade do par CAP/agregados.

##### **2.4.1. Descolamento**

O descolamento é definido como a separação entre o filme de CAP e a superfície do agregado por uma fina camada de água tanto na forma líquida quanto na forma de vapor, sem quebra do filme de CAP. Este processo está relacionado aos tipos de materiais, tráfego, projeto e construção de vias e a fatores climáticos. É importante haver uma compatibilidade química entre o par CAP/agregados, pois o descolamento do

filme de CAP poderá levar o revestimento à ruína em um curto espaço de tempo (Solaimanian *et al.*, 2003).

A ligação química entre o CAP e os agregados é um fenômeno termodinâmico que dependerá da energia de superfície dos mesmos. A energia de superfície está relacionada com a quantidade de energia ou trabalho exigido para realizar a separação entre o CAP e o agregado, sendo que a superfície do agregado possui maior preferência pela água do que pelo CAP. Tal preferência se deve ao fato de que a ligação estabelecida entre os agregados e o CAP é relativamente fraca. Esse fenômeno se deve à baixa atividade polar presente na grande maioria dos CAPs em relação à elevada atividade polar presente nas moléculas de água e também à baixa viscosidade da água em relação ao CAP promovendo o descolamento entre o agregado e o filme de CAP (Caro, 2009).

#### **2.4.2. Deslocamento**

O deslocamento é descrito como uma remoção preferencial do filme de CAP da superfície do agregado pela água. Este tipo de mecanismo deve-se a alguns fatores como: (i) cobertura parcial do CAP na superfície do agregado, (ii) perfuração do filme de CAP devido a presença de cantos pontiagudos possibilitando a entrada de água na interface CAP/agregados, e (iii) utilização de partículas de forma plana ou alongada (lamelar) em misturas asfálticas. A quebra de partículas durante a compactação pode ocorrer fazendo com que o filme de CAP, que cobre o agregado, se rompa, possibilitando a entrada de umidade na interface do par CAP/agregados (Furlan *et al.*, 2004).

No processo de deslocamento podem ocorrer mudanças no pH da água presente na superfície do agregado alterando o tipo de grupos polares adsorvidos. Esse processo pode levar a intensificação de uma dupla camada elétrica na superfície do agregado e do CAP. A polaridade do agregado é um fator importante na ligação com o CAP devido à formação de duplas camadas elétricas que irão atrair mais moléculas de água ocasionando assim a separação física entre agregado e CAP.

### 2.4.3. Emulsificação Espontânea

O processo de emulsificação espontânea ocorre quando uma emulsão de fase invertida (água suspensa dentro do CAP) se forma dentro da mistura asfáltica havendo rompimento da ligação adesiva agrava-se pela presença de emulsificadores como argilas (que irão proporcionar um recobrimento inapropriado do agregado pelo CAP devido a capacidade das argilas de terem uma grande afinidade de adsorver a água) e aditivos, como os emulsificadores catiônicos asfálticos.

A presença de compostos nitrogenados de natureza básica no CAP (de maneira especial as piridinas) proporciona atividade adesiva em relação aos centros ativos existentes nos agregados de natureza silicosa (ou ácidos). No entanto, a presença de tais componentes dependerá da natureza do CAP. Compostos nitrogenados básicos (diaminas) podem proporcionar a adesão, entretanto, deterioram-se quando expostos a temperaturas elevadas ( $> 140^{\circ}\text{C}$ ) por um longo período. Portanto, este tipo de composto nitrogenado básico só será efetivo quando adicionado no momento da usinagem (Liberatori e Constantino, 2006).

### 2.4.4. Pressão Neutra

A pressão neutra ocorre devido à presença de água nos vazios interconectados (devido à densificação pela ação do tráfego) e a água armazenada dentro de vazios isolados com dificuldade de percolação. A ação do tráfego faz com que a pressão neutra aumente e então diminua outra vez após cada passagem. Esta ação contínua de aumento-diminuição da pressão neutra pode romper o filme de CAP e conduzir ao deslocamento ou ao polimento hidráulico (Figura 2.5).

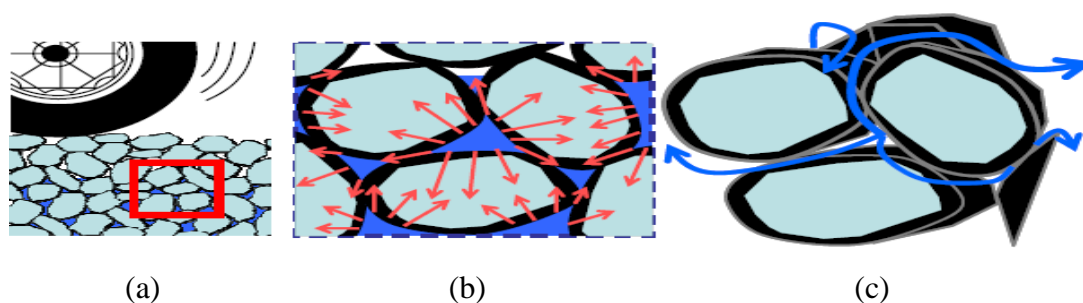


Figura 2.5 – Bombeamento de água no pavimento ocasionando o espalhamento através: (a) da ação do tráfego, (b) do excesso de pressão neutra e (c) do fluxo de água (Kringos, 2007)

### 2.4.5. Polimento Hidráulico

Também conhecido como desgaste hidráulico, o polimento hidráulico ocorre na superfície do revestimento quando a água é empurrada para dentro da mistura asfáltica devido à ação dos pneus. A água é comprimida dentro do revestimento em frente ao pneu, resultando em uma tensão compressiva dentro de uma estrutura vazia interconectada. Quando o pneu passa, há formação de vácuo, puxando a água de volta para fora dos vazios interligados. Este ciclo de compressão-tensão ocorre toda vez que um veículo passa sobre o pavimento podendo levar ao dano por umidade devido ao deslocamento ou emulsificação espontânea.

## 2.5. Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP), Agregados e Volume de vazios (Vv): Características Relacionadas ao Dano por Umidade de uma Mistura Asfáltica

### 2.5.1. Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP)

O CAP é constituído por 90 a 95% de carbono e hidrogênio, ou seja, hidrocarbonetos que são de natureza apolar. Os demais átomos, designados de heteroátomos (oxigênio, nitrogênio, enxofre, níquel, vanádio, ferro, etc.), são unidos por ligações covalentes. Estes heteroátomos apresentam fundamental importância na interação química do CAP com os agregados. Segundo Bernucci *et al.* (2007), a composição química do CAP varia de acordo com o tipo de separação à qual o mesmo é submetido. Um dos processos de separação é conhecido como SARA: Saturados, Aromáticos, Resinas e Asfaltenos) (Figura 2.6).

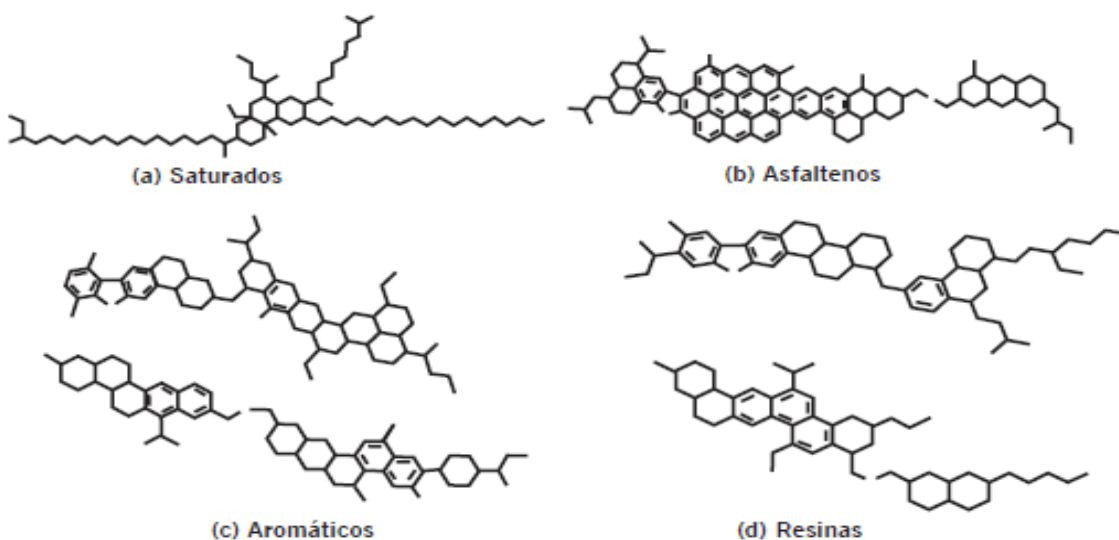


Figura 2.6 – Representação molecular dos componentes do CAP (Bernucci *et al.*, 2007)

O CAP apresenta em sua constituição compostos de natureza ácida e básica sendo a maioria destes compostos de natureza ácida. A nível molecular, os compostos ácidos e nitrogenados básicos tendem a apresentar maiores adsorções à superfície dos agregados em relação às cetonas e aos grupos nitrogenados não básicos. Um *ranking* de alguns grupos funcionais foi estabelecido com relação à afinidade de adsorções à superfície dos agregados: sulfóxidos > ácidos carboxílicos > compostos nitrogênicos não básicos  $\geq$  cetonas > compostos nitrogenados básicos > fenóis (Solaimanian *et al.*, 2003).

Durante a usinagem, armazenamento, aplicação e vida de serviço, o CAP é submetido a um processo de envelhecimento no qual endurece, apresentando mudanças em suas características físicas, reológicas e químicas, o que acarreta aumento de sua consistência. Ao entrar em contato com o ar, o CAP sofre um processo de oxidação. O grau de oxidação é consequência de alguns fatores, dentre eles: temperatura, espessura da película do CAP e tamanho da superfície e tempo de exposição da mesma ao ar.

No envelhecimento à curto prazo, a oxidação acontece ainda na usina durante o preparo da mistura caracterizando-se pela exposição do CAP a temperaturas mais elevadas do que aquelas especificadas. Esse processo ocasiona a queima de componentes orgânicos do CAP. O resultado dessa queima acarreta em volatilização e/ou perda de constituintes leves do CAP e o, conseqüente, aumento da viscosidade. A alteração na viscosidade ocorre devido aos grupos polares oxigenados possuírem tendência a se associarem entre si produzindo micelas de elevada massa molar (Furlan, 2006; Araújo, 2007). A Figura 2.7 mostra um esquema no qual estão representadas as ligações entre CAP puro e oxidado com o agregado na região da interface do par CAP/agregados.

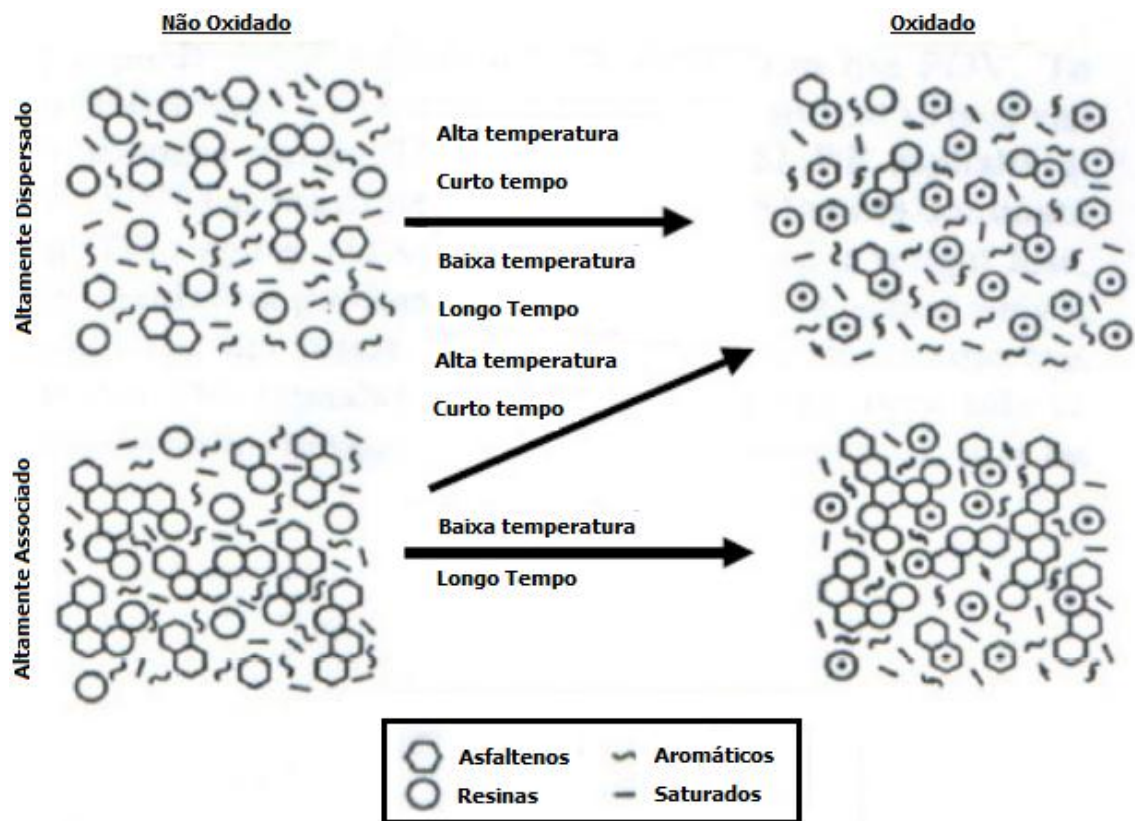


Figura 2.7 – Esquema representativo do envelhecimento do CAP puro e oxidado (Peterser *et al.*, 1993)

### 2.5.2. Agregados

A perda da adesividade é bastante influenciada pelas propriedades dos agregados. Tarrer e Wagh (1991) e Gouveia *et al.* (2004) destacaram uma série de fatores que influenciam a interação química no par CAP/agregados tais como: (i) textura superficial, (ii) características dos poros, (iii) composição química, (iv) angularidade do agregado, (v) envelhecimento da superfície do agregado por influência do intemperismo, (vi) coberturas adsorvidas nos agregados e (vii) natureza dos agregados secos *versus* molhados.

O estudo feito por Hanz *et al.* (2007) indicou que as propriedades físicas e mineralógicas dos agregados são os dois principais fatores determinantes da adesão e do potencial ao dano por umidade em misturas asfálticas. As propriedades mineralógicas e as especificidades das estruturas cristalinas dos agregados permitem que os mesmos sejam classificados como ácidos ou básicos, conforme o teor de sílica ( $\text{SiO}_2$ ) (Figura 2.8).



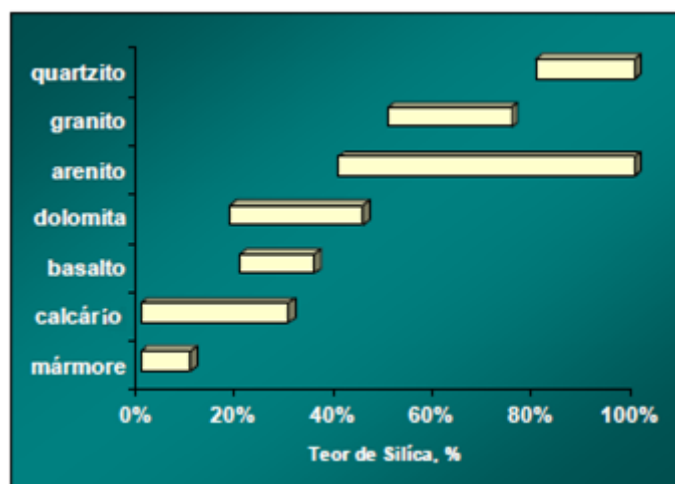


Figura 2.8 – Teor de sílica presente nos principais tipos de agregados utilizados em misturas asfálticas (Liberatori e Constantino, 2006)

A reação química entre a maioria dos CAPs e dos agregados ácidos (quartzo e granito, por exemplo) é fraca quando comparada a existente entre CAPs e agregados básicos (calcário e dolomita, por exemplo). Quanto maior o teor de sílica, maior será a acidez do agregado. Os agregados de natureza ácida necessitam de compostos com características básicas como promotores de adesão e vice-versa.

Normalmente, agregados com elevado teor de sílica apresentam má adesividade com a maioria dos CAPs devido à maioria dos compostos polares presentes no CAP apresentar natureza ácida. No caso dos agregados alcalinos, como o calcário, a adesividade dependerá fundamentalmente da acidez naftênica do CAP. Portanto, a compatibilidade química entre o CAP e os agregados colabora para que a mistura asfáltica tenha maior resistência à ação deslocadora da água (Liberatori e Constantino, 2006). Gouveia *et al.* (2004) afirmaram que agregados com elevado teor de sílica possuem maior afinidade com a água sendo designados de agregados hidrofílicos. Agregados de natureza básica possuem baixa concentração de sílica, apresentam melhor desempenho perante o efeito deletério da água nas misturas e são designados de agregados hidrofóbicos (Tabela 2.2 de Hanz *et al.*, 2007).

Tabela 2.2 – Relação entre as propriedades mineralógicas do agregado com relação à resistência ao dano por umidade (Hanz *et al.*, 2007)

Afinidade do Agregado com a Água	Definição	Composição	Teor de Sílica	Resistência ao Dano por Umidade
Hidrofílico	Possuem maior afinidade pela água	Ácido	Alto	Pobre
Hidrofóbico	Possuem maior afinidade pelo CAP	Básico	Baixo	Boa

Outro fenômeno relacionado à adesão do CAP à superfície do agregado é a formação de interações eletrostáticas. De acordo com Shah (2003), a heterogeneidade da superfície dos agregados faz com que estes materiais apresentem sítios ativos os quais são frequentemente carregados, ou ainda possuam cargas parciais que poderão atrair e conduzir constituintes do CAP (Figura 2.9).

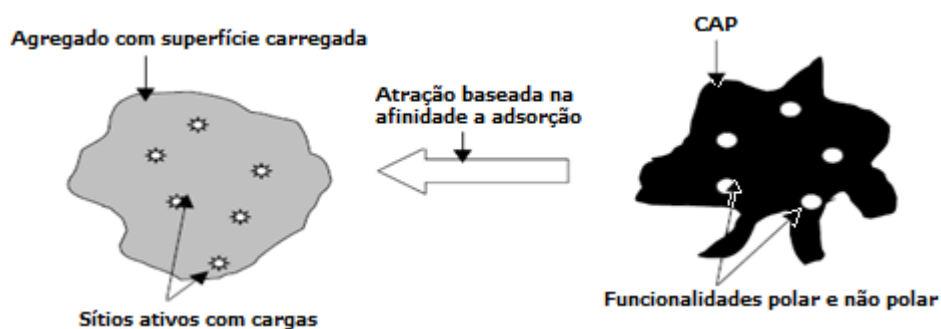


Figura 2.9 – Química do par CAP/agregado (Shah, 2003)

A intensidade destas interações dependerá do par CAP/agregado e a formação destas está relacionada à natureza química dos materiais (Liberatori e Constantino, 2006). Tanto o CAP quanto os agregados não possuem uma distribuição uniforme dessas interações eletrostáticas, sendo que os tipos de agregados variam largamente com relação a essas interações que são ocasionadas pelas mudanças ambientais. Os agregados podem apresentar cargas positivas ou negativas, entretanto, um grande complicador é a presença dos dois tipos de cargas elétricas em alguns tipos de agregados (Gouveia *et al.*, 2004).

### 2.5.3. Volume de vazios ( $V_v$ )

O efeito deletério da água num revestimento está intimamente associado à capacidade da água infiltrar-se em seus espaços vazios também designados de Volume de vazios

(Vv). Essa permeabilidade é justificada pela porosidade do revestimento sendo expressa em porcentagem. Os revestimentos asfálticos são projetados para terem Vv inicial de 7%, com valor médio de 4% devido a densificação ocasionada pelo tráfego posteriormente, podendo chegar a ter 2% ao final da sua vida útil (Ribeiro *et al.*, 2011).

Além do Vv, Arambula (2007) destaca outros fatores facilitadores da permeabilidade da água, tais como: (i) tamanho e granulometria dos agregados, (ii) espessura do filme de CAP, (iii) espessura da camada de revestimento e (iv) esforço de compactação. No entanto, esta autora afirma que é difícil estabelecer uma relação entre estas variáveis e a permeabilidade devido à natureza anisotrópica e à heterogeneidade da mistura asfáltica. Caro *et al.* (2008a) afirmaram que o tamanho e a distribuição dos vazios em misturas asfálticas dependem principalmente das propriedades dos agregados, do projeto de mistura e do processo de compactação. O Vv numa mistura asfáltica pode ser classificado como: (i) impermeável (Vv abaixo de 5%), (ii) prejudicial (Vv entre 6 e 14%) ou (iii) drenagem livre (Vv acima de 15%) (Figura 2.10).

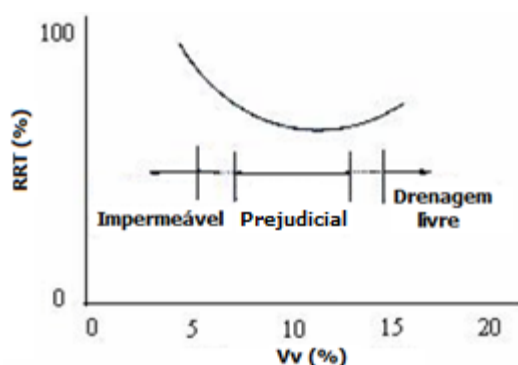


Figura 2.10 – Classificação do Vv em misturas asfálticas (Adaptado de Furlan, 2006)

A análise da estrutura interna de misturas asfálticas pode ser feita utilizando técnicas não destrutivas como a tomografia computadorizada (Castelblanco *et al.*, 2005; Nascimento *et al.*, 2006; Masad *et al.*, 2009). Nascimento *et al.* (2006), com o auxílio da tomografia computadorizada e do *software* computacional IMAGO, analisaram o Vv em misturas asfálticas provenientes dos compactadores Superpave (amassamento) e Marshall (impacto) e em Corpos de Prova (CPs) extraídos do campo. Estes autores dividiram os CPs em três regiões homocêntricas cilíndricas: (i) central, (ii) intermediária e (iii) externa. Em cada uma dessas regiões o Vv também foi verificado ao longo da altura (Figura 2.11).

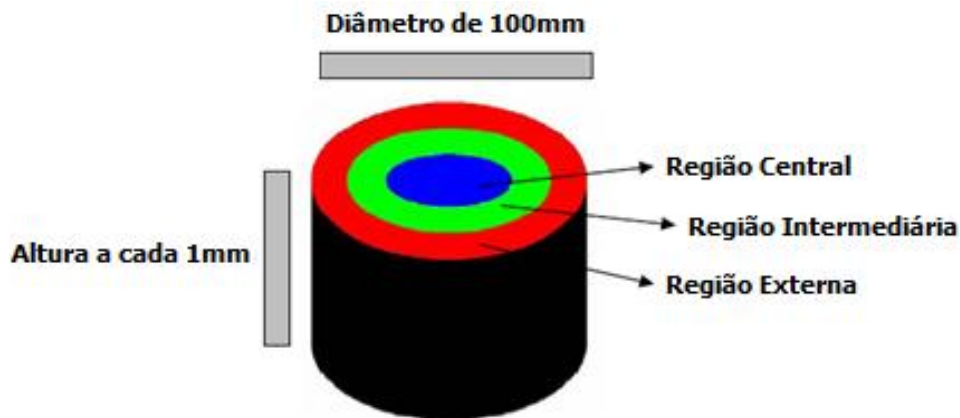
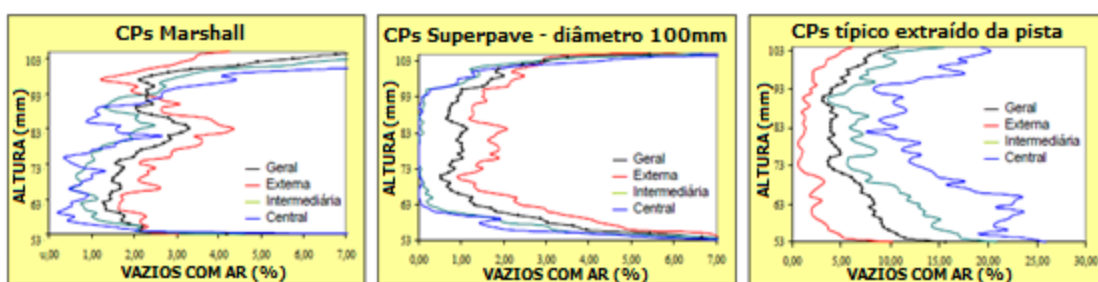


Figura 2.11 – Análise da distribuição do Vv do CP divididos em três regiões homocêntricas cilíndricas (Adaptado de Nascimento *et al.*, 2006)

Na Figura 2.12 são exibidos os gráficos referentes aos resultados das análises tomográficas obtidas por Nascimento *et al.* (2006). No eixo das abscissas estão representados os valores referentes à porcentagem de vazios preenchidos com ar, enquanto que no eixo das ordenadas estão representados os valores referentes à altura dos CPs. Vale salientar que, no eixo das ordenadas, a altura dos CPs não iniciou de zero por limitações do tomógrafo utilizado por estes autores. Nos gráficos, percebem-se curvas nas seguintes cores: (i) preta, referente a distribuição dos vazios em toda a extensão da altura do CP, (ii) vermelha, referente a distribuição dos vazios na parte externa do CP, (iii) verde, referente a distribuição dos vazios na parte intermediária do CP e (iv) azul, referente a distribuição dos vazios na parte central do CP.



(a) Marshall

(b) Superpave

(c) Campo

Figura 2.12 – Distribuição do Vv em CPs compactados pelos métodos: (a) Marshall, (b) Superpave e (c) extraídos da pista (Nascimento *et al.*, 2006)

De acordo com os resultados encontrados, Nascimento *et al.* (2006) verificaram que o método de compactação influencia diretamente a estrutura interna das misturas asfálticas. Portanto, pela análise tomográfica realizada por esses autores, comprovou-se

que a parte central de CPs compactados pelo método Superpave apresenta uma maior densificação com vazios próximos a zero, em relação a CPs compactados pelo método Marshall.

A má adesividade entre CAP e agregado, quando o Vv ou a umidade são excessivos, compromete o desempenho de misturas asfálticas a curto, médio e longo prazos (Moura, 2001; Furlan *et al.*, 2004). Moura (2001) afirma que esse fenômeno não acontece no pavimento inteiro, mas em áreas localizadas com vazios de ar saturados com água ou com vapor de água.

## 2.6. Líquido da Castanha de Caju (LCC)

O cajueiro (*Anacardium occidentale, L.*) é uma árvore originária do Norte e do Nordeste do Brasil. Seu pedúnculo, é na realidade um pseudofruto de coloração variante entre vermelho e amarelo, é muito apreciado para consumo alimentício pela sua suculência. Seu fruto é a popularmente conhecida castanha de caju, também usada como alimento e muito apreciada. A castanha, que possui casca coriácea lisa, mesocarpo alveolado, é repleta de um líquido escuro quase negro, caústico e inflamável denominado de Líquido da Castanha de Caju (LCC) ou *Cashew Nut Shell Liquid* (CNSL), como é internacionalmente conhecido. Na estrutura interna da castanha, localiza-se a amêndoa que apresenta dois cotilédones de natureza oleosa e carnosa, e esta compõe a parte comestível do fruto, coberta por uma película de aparência avermelhada (Figura 2.13).

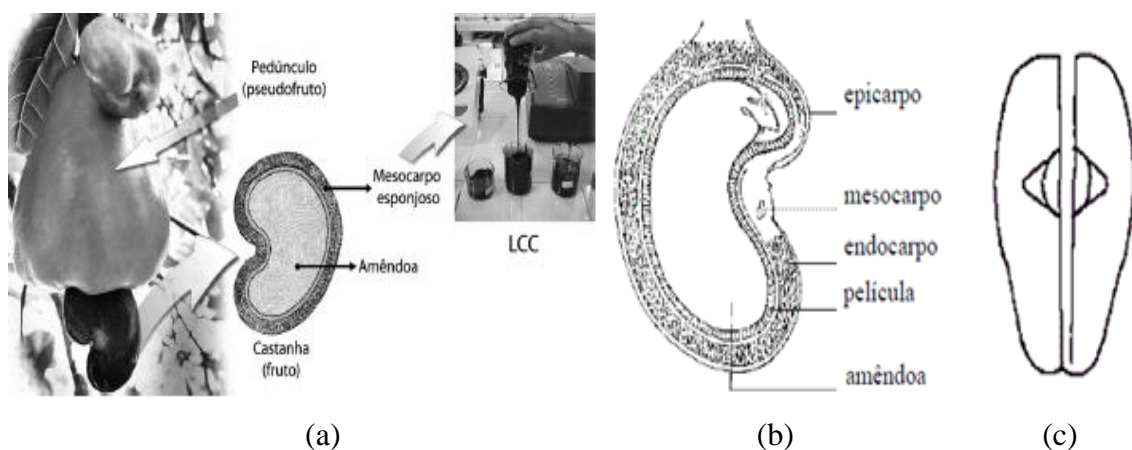


Figura 2.13 – (a) Caju, castanha de caju e LCC, (b) Corte transversal da castanha e (c) Corte longitudinal ao longo da linha natural de clivagem utilizado para a remoção da amêndoa (França, 2007; Mazzeto e Lomonaco, 2009)

De acordo com Mazzeto e Lomonaco (2009), o LCC representa 25% do peso da castanha de caju, de valor muito baixo sendo considerado um subproduto do agronegócio do caju. O principal produtor e exportador do LCC nacional é o estado do Ceará, seguido pelos estados do Piauí e do Rio Grande do Norte (Tabela 2.3).

Tabela 2.3 – Exportações de LCC relativas ao ano de 2010 (Sindicaju, 2011)

Dado	Local			
	Ceará	Piauí	Rio Grande do Norte	Brasil
Valor (U\$)	8.678.775,00	74.000,00	1.270.479,00	26.571.388,00
Quantidade (Kg) Líquido	20.958.115	145.200	3.591.490	25.739.261
Preço Médio (U\$/Kg)	0,41	0,51	0,35	1,03

O LCC é muito rico em lipídeos fenólicos não isoprenóides: (i) ácido anacárdico (ácido 3-n-pentadecilsalicílico), (ii) cardanol (3-n-pentadecilfenol), (iii) cardol (3-n-pentadecilresorcinol), (iv) 2-metilcardol (2-metil-5-n-pentadecilresorcinol), além de material polimérico entre outros constituintes (Figura 2.14).

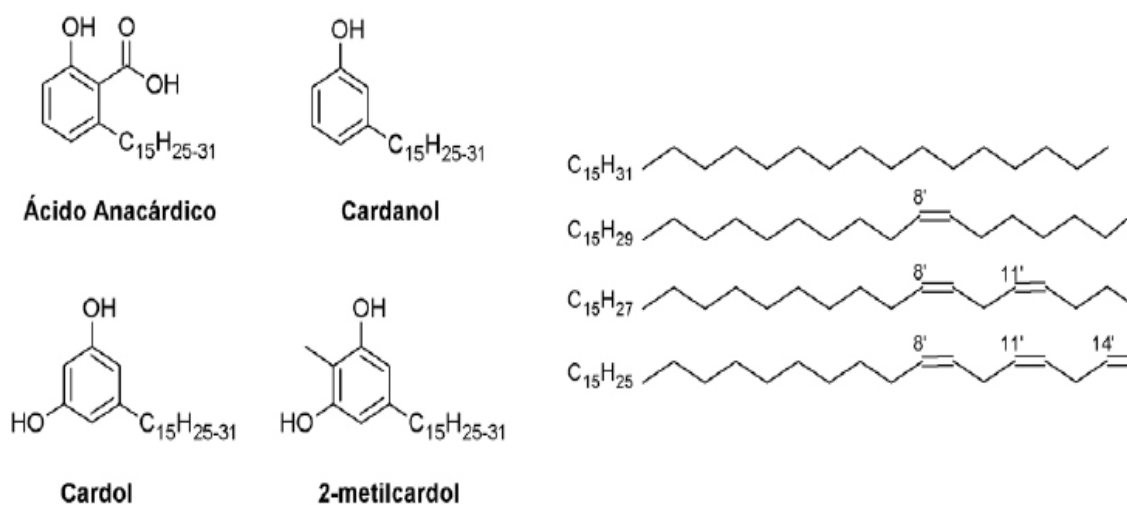


Figura 2.14 – Composição química do LCC (Mazzeto e Lomonaco, 2009)

O processo de extração do LCC é feito através da utilização de solventes (LCC natural) ou à quente (LCC técnico). Mazzeto e Lomonaco (2009) afirmam que o LCC pode ser extraído a frio (prensas) e através do processo térmico-mecânico (*hot oil process*) no qual o próprio LCC ainda quente, é utilizado no aquecimento das castanhas *in natura* em uma temperatura de aproximadamente 190°C. Essa temperatura faz com que haja rompimento da casca externa liberando os alquilfenóis presentes no mesocarpo. Em seguida, acontece a retirada da casca interna permitindo a recuperação das amêndoas.

Em temperaturas elevadas (180°C), inicia-se o processo de descarboxilação (perda do grupamento carboxila – COOH) do ácido anacárdico convertendo-se este ao cardanol (Figura 2.15). O LCC produzido através desse procedimento é denominado de LCC técnico.

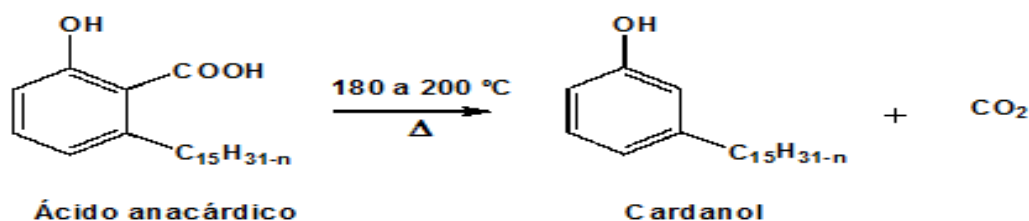


Figura 2.15 – Processo de descarboxilação do ácido anacárdico em cardanol (França, 2007)

O processo de descarboxilação explica a grande diferença nas composições químicas do LCC técnico e do LCC natural. O LCC natural apresenta um grande teor de ácido anacárdico não havendo material polimérico em sua constituição. Contudo, o LCC técnico apresenta um elevado teor de cardanol e também de material polimérico. A Tabela 2.4 apresenta a composição dos componentes fenólicos para o LCC natural e para o LCC técnico.

Tabela 2.4 – Composição dos componentes fenólicos do LCC natural e técnico (Mazzeto e Lomonaco, 2009)

Componentes fenólicos	Tipo de LCC	
	Natural (%)	Técnico (%)
Ácido anacárdico	71,7 – 82,0	1,1 – 1,8
Cardanol	1,6 – 9,2	67,8 – 94,6
Cardol	13,8 – 20,1	3,8 – 18,9
2-metilcardol	1,6 – 3,9	1,2 – 4,1
Outros	0 – 2,0	0 – 7,4

O LCC vem sendo empregado na indústria como antioxidante para combustíveis e para lubrificantes. Além da atividade antioxidante e de acordo com a natureza química de seus constituintes, o LCC apresenta também características surfactantes que podem contribuir potencialmente para melhorar a estabilidade de CAPs modificados por polímeros. Rabêlo (2006) demonstrou a viabilidade do uso do LCC como diluente asfáltico após verificar a formação de uma mistura homogênea deste com o CAP e sem ocorrência de sedimentação. O autor também recomenda, tendo em vista as qualidades

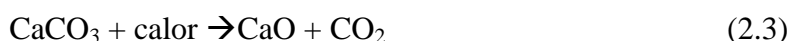
antioxidantes, o uso do LCC como solução alternativa para imprimação em relação aos tradicionais solventes de petróleo por este não ser poluente e ser produzido em abundância no estado do Ceará.

Bringel (2007) verificou a eficácia do LCC como agente redutor do envelhecimento de CAP modificado com o polímero EVA. Alencar (2009) verificou que o LCC diminuiu a viscosidade de CAP modificado com EVA e EVAR. Tal comportamento demonstra a importância deste aditivo na melhoria da trabalhabilidade de misturas asfálticas. Esta autora ainda ressalta a importância do LCC como antioxidante, por este reduzir o envelhecimento do CAP devido à presença de grupos fenólicos em sua constituição.

Rodrigues (2010) verificou que o LCC apresentou um efeito positivo para a estabilidade à estocagem do CAP modificado com o polímero SBS. Lima *et al.* (2009) indicaram o LCC como potencial aditivo alternativo para a melhoria da estabilidade à estocagem do CAP com SBS, além de ser um produto abundante, de baixo custo e pouco agressivo ao meio ambiente.

## 2.7. Cal

O óxido de cálcio (CaO) também conhecido como cal, cal viva ou cal virgem, é um composto sólido branco sendo obtido através da decomposição térmica do calcário (CaCO<sub>3</sub>). A Equação 2.3 representa o processo de decomposição do calcário e a obtenção da cal.



Outro tipo de cal é a cal hidratada (Ca(OH)<sub>2</sub>) sendo esta composta por um pó branco resultante da reação entre os óxidos anidros da cal virgem com a água. A Equação 2.4 mostra o processo de obtenção da mesma.



A cal hidratada é o tipo de cal mais utilizado em misturas asfálticas e sua utilização resulta em benefícios dentre os quais o aumento da vida de fadiga e da resistência à deformação permanente assim como o aumento da resistência ao dano por umidade (Vasconcelos *et al.*, 2007). Little *et al.* (2006) citam ainda outras vantagens com relação ao uso da cal em pavimentos:



- Atuar como fíler mineral enrijecendo o CAP e a mistura asfáltica;
- Melhorar a resistência ao crescimento de trincas, ou seja, melhorar a tenacidade à fratura a baixas temperaturas;
- Alterar convenientemente a cinética de oxidação e interagir com produtos de oxidação para diminuir seus efeitos deletérios;
- Alterar as propriedades plásticas da argila para melhorar a estabilidade da mistura asfáltica e a durabilidade.

Sebally *et al.* (2003) observaram que o tratamento com a cal proporcionou um aumento no tempo de vida útil do pavimento por um período médio de três anos. Furlan (2006) verificou que a cal evidenciou seu efeito como melhorador de adesividade principalmente para misturas com agregados de natureza granítica. Furlan *et al.* (2008) verificaram que a adição da cal à mistura asfáltica produz efeitos benéficos seja melhorando e/ou conservando as propriedades originais, mesmo após a saturação e o ciclo de condicionamento térmico.

Lutif *et al.* (2008) verificaram a diminuição da suscetibilidade das misturas asfálticas ao utilizarem a cal hidratada de duas maneiras diferentes: (i) seca e (ii) em pasta. Estes autores observaram que, a adição de cal hidratada em forma seca parece ser a maneira mais eficaz de aplicação da cal hidratada e, quando utilizada na correta proporção entre cal e água, a mistura asfáltica em forma de pasta de cal poderá apresentar bom comportamento mecânico.

Grande *et al.* (2009) verificaram que a cal aumentou a rigidez de misturas asfálticas se comparada à misturas contendo apenas CAP convencional. Quando a cal é adicionada ao CAP, ela fortalece a ligação entre CAP e agregados melhorando a resistência do próprio CAP perante o efeito deletério da água. Alguns estudos afirmam que o teor de cal necessário para proporcionar a molhabilidade necessária entre CAP e agregados, é de 1 a 2% em peso da mistura (Gorken e Sengos, 2009; Kok e Yilmaz, 2009).

## **2.8. Agentes Melhoradores de Adesividade (AMA)**

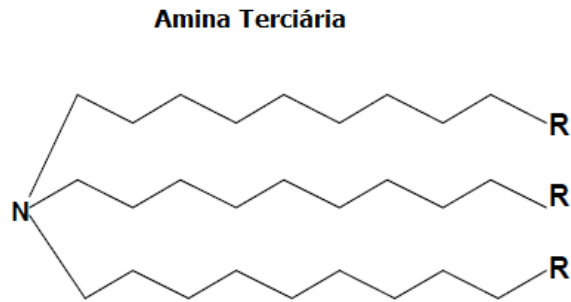
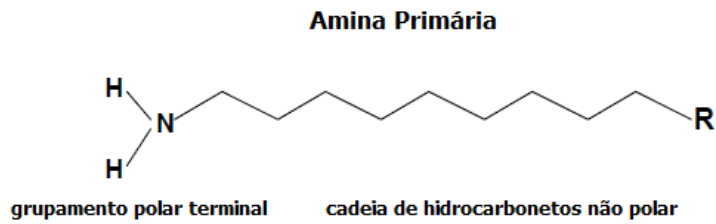
A compatibilidade química entre CAP e agregado colabora para que a mistura asfáltica tenha uma maior resistência à ação deslocadora da água. Quando não há uma ligação química efetiva, são utilizados aditivos promotores de adesão (líquidos ou sólidos) ou Agentes Melhoradores de Adesividade (AMA) para melhorar a compatibilidade entre

CAP e agregados. Portanto, os AMA também conhecidos como DOPES, podem ser necessários quando um determinado projeto de mistura apresentar suscetibilidade ao dano por umidade (Oliveira Filho, 2007).

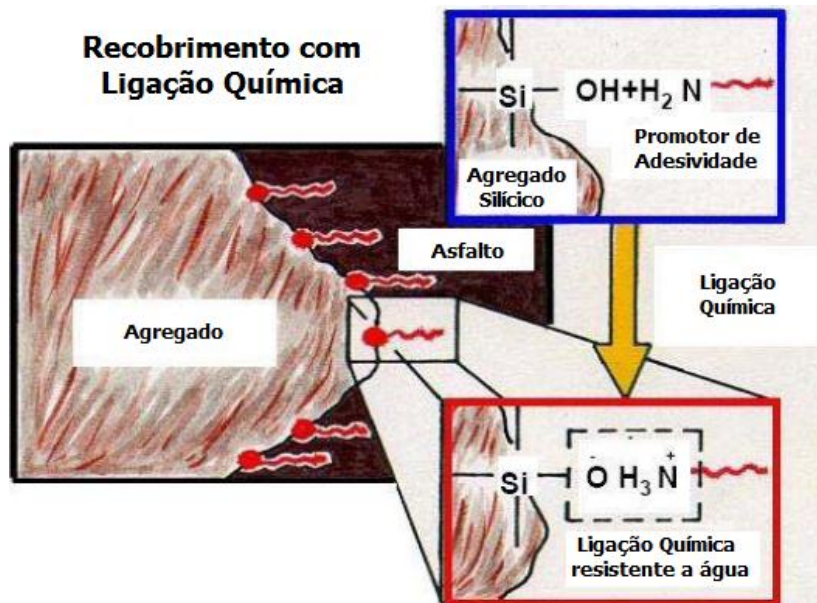
Nos Estados Unidos, conforme dados apresentados por Solaimanian *et al.* (2003), de 55 agências administradas pelo Departamento de Transportes do Colorado constatou-se que 82% destas exigiram algum tipo de tratamento para danos ocasionados pela água em pavimentos. Dentre esses tratamentos, 56% foram tratados utilizando aditivos líquidos, 15% utilizavam aditivos líquidos e cal, e 29% utilizaram apenas cal.

Solaimanian *et al.* (2003) afirmam que a eficácia de um DOPE dependerá das propriedades físico-químicas do CAP e dos agregados assim como a quantidade de DOPE a ser utilizado. Liberatori e Constantino (2006) afirmam que essa atividade adesiva dependerá da natureza do CAP e que esta pode ser insuficiente para as combinações feitas com determinados tipos de agregados básicos.

Os DOPES apresentam as seguintes características: (i) grupamento amina terminal polar, responsável pela ligação com um sítio ácido silicoso presente na superfície do agregado e (ii) cadeia não polar de hidrocarbonetos que é parte do CAP (Little e Bhasin, 2005) (Figura 2.16). Portanto, a presença destes compostos nitrogenados básicos proporcionam a adesividade face aos centros ativos presentes em agregados de natureza silicosa. Contudo, segundo Little e Bhasin (2005), o comprimento da cadeia de hidrocarbonetos (R) e o número de grupos aminas influenciam na adesão. A Figura 2.16, apresenta as características das aminas presentes nos DOPES e a formação da ligação química entre CAP e agregados.



(a)



(b)

Figura 2.16 – (a) Características das aminas presentes em um DOPE e (b) Formação da ligação química entre o CAP e os agregados (Little e Bhasin, 2005 e Liberatori e Constantino, 2006)

## 2.9. Principais Técnicas Utilizadas para a Caracterização do CAP Convencional e Modificado

### 2.9.1. Espectroscopia na Região do Infravermelho (IV)

A espectroscopia na região do infravermelho é uma técnica comumente utilizada para a caracterização estrutural de substâncias e materiais. As análises podem ser qualitativa

(identificação) e quantitativa, por exemplo a caracterização dos diversos grupos funcionais de uma amostra. Essa técnica é baseada na emissão de radiação eletromagnética na região do infravermelho que interage com a matéria proporcionando os seguintes fenômenos: (i) mudança do estado de vibração dos grupamentos químicos das substâncias, (ii) alteração nos vetores de momento dipolo e (iii) alteração nos modos de vibração da moléculas (Figura 2.17).

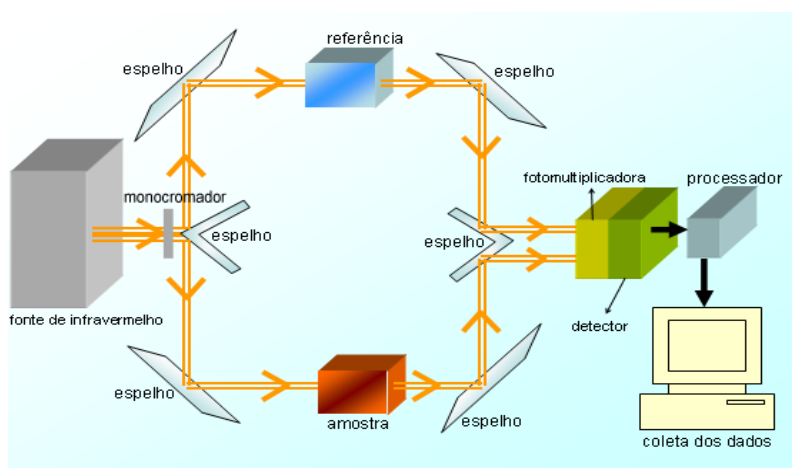


Figura 2.17 – Esquema representativo de um espectrômetro de infravermelho (Paolini, 2010)

O espectrômetro por transformada de Fourier (*Fourier Transform Infrared* – FTIR) é o equipamento utilizado para obtenção do espectro de infravermelho além da utilização do interferômetro de Michelson. A análise FTIR tem sido uma ferramenta útil para o estudo de grupamentos constitutivos do CAP, tais como aromáticos, alifáticos e heteroátomos (Lamontagne *et al.*, 2001). Esta técnica também é útil para a identificação de grupos funcionais que são formados ou que sofrem alterações durante o processo de oxidação do CAP. Entretanto, há contestações sobre a predominância de tais grupos funcionais (anidridos, cetonas, ácidos carboxílicos ou ésteres) (Masson *et al.*, 2001).

Estudos, realizados por Lucena (2005) com CAPs de diferentes fontes através da espectroscopia FTIR, constataram um aumento dos grupamentos carbonílicos e sulfóxidos devido à oxidação do CAP durante o envelhecimento simulado e que CAPs provenientes de diferentes fontes apresentaram diferentes formas de oxidação. Fernandes (2007) e Bringel (2007) verificaram a presença de grupamentos aromáticos e alifáticos além de carbonílicos, sulfóxidos entre outros constituintes do CAP através da espectroscopia FTIR.

A espectroscopia no infravermelho é uma técnica rápida, utiliza pequena quantidade de material e poder ser aplicada em amostras sólidas, líquidas ou gasosas. A utilização de vários acessórios conectados ao espectrômetro facilita a obtenção de espectros em diferentes formas, estados e morfologias. A reflectância total atenuada (*Attenuated Total Reflectance* - ATR) é um exemplo de acessório utilizado para a obtenção destes espectros. O princípio de funcionamento dessa técnica é caracterizado pela reflexão do feixe de radiação quando o mesmo atravessa um meio de maior densidade (cristal de ATR) para outro meio de menor densidade (amostra avaliada). Devido às múltiplas reflexões, conforme o comprimento da amostra, a intensidade da radiação é atenuada, ou seja, acontece a refletância total atenuada produzindo um espectro de superfície (Figura 2.18).

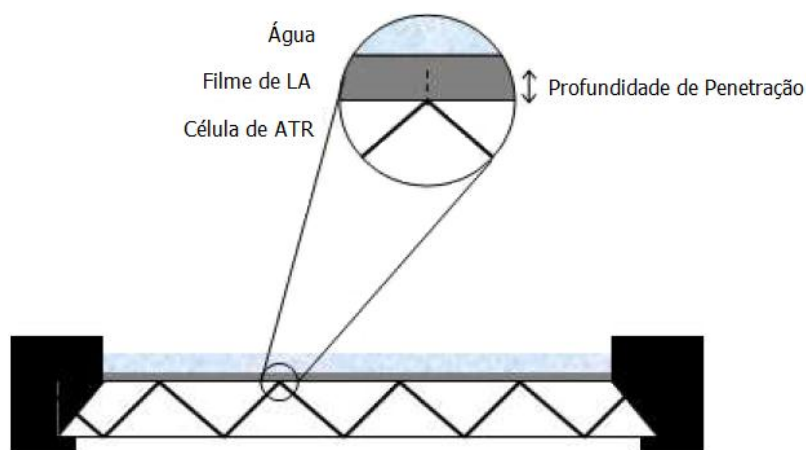


Figura 2.18 – Esquema de um cristal de ATR (Vasconcelos, 2010)

Vasconcelos (2010), através da FTIR com o acessório ATR, verificou como acontece a difusão ou a permeabilidade da umidade na interface do par CAP/agregados utilizando quatro tipos de CAPs de diferentes fontes (Wyoming, costa da Califórnia, Texas e vale da Califórnia). Estes materiais foram submetidos a três ciclos de hidratação seguidos por ciclos de desidratação nos quais se verificou o aumento da difusividade da água a cada ciclo, principalmente após o primeiro ciclo, e as relações entre as mudanças na difusividade e o tipo de CAP.

### 2.9.2. Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC)

O termo calorimetria exploratória diferencial (*Diferencial Scanning Calorimeter* - DSC) pode ser definido como uma técnica utilizada para medir a variação de temperatura de

uma amostra em relação a um material de referência. A diferença de temperatura ( $\Delta T$ ) é dada pela diferença entre a temperatura da amostra ( $T_A$ ) e a temperatura do material de referência ( $T_R$ ), conforme pode ser visto na Equação 2.5.

$$\Delta T = T_A - T_R \quad (2.5)$$

O material de referência não deve apresentar absorção ou liberação de calor sendo considerado termicamente inerte. Estas medidas proporcionam informações qualitativas e quantitativas relacionadas a variações químicas e físicas que envolvem métodos exotérmicos (liberação de calor), endotérmicos (absorção de calor) ou variações na capacidade calorífica. Esta técnica pode fornecer informações sobre: (i) análise de blendas e copolímeros, (ii) determinação de pureza da amostra, (iii) capacidade calorífica, (iv) estabilidade oxidativa e térmica, (v) temperatura de transição vítrea ( $T_g$ ), (vi) temperatura de fusão ( $T_m$ ), (vii) temperatura e tempo de cristalização, (viii) cinética de reação e outros.

Diferentes tipos de equipamentos com o mesmo nome são utilizados para a realização de ensaios de calorimetria exploratória diferencial:

- DSC de fluxo de calor: corresponde ao arranjo mais simples no qual a amostra e o material de referência, depositados em seus respectivos suportes de amostra, são posicionados sobre um disco termoelétrico e aquecidos em uma única câmara de aquecimento;
- DSC de compensação de potência: corresponde ao arranjo no qual o material de referência e a amostra são mantidos em condições isotérmicas, ou seja, na mesma temperatura, em duas câmaras de aquecimento separadas.

A Figura 2.19 mostra uma representação típica de uma curva de DSC cuja orientação dos picos dependerá do equipamento utilizado. Geralmente, os equipamentos de DSC de fluxo de calor são ajustados para exibirem picos endotérmicos para baixo, no sentido negativo do fluxo de calor e picos exotérmicos para cima, no sentido positivo do fluxo de calor. Nos equipamentos de DSC de compensação de potência é adotada a convenção termodinâmica no qual os eventos endotérmicos possuem variação positiva de entalpia. Dessa maneira, os picos obtidos na curva de DSC são ascendentes para eventos endotérmicos e descendentes para eventos exotérmicos. Para se evitar problemas de interpretação, recomenda-se mostrar nas curvas o sentido adotado através de uma seta

acompanhada dos termos endo ou exo (para baixo ou para cima de acordo com o modelo adotado).

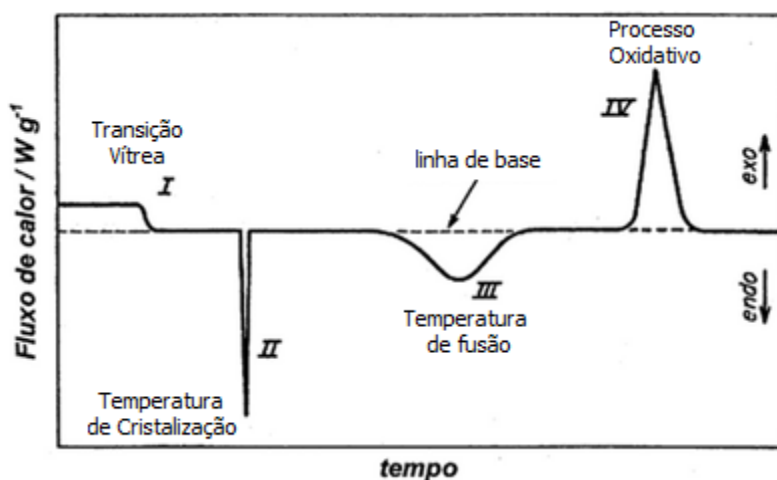


Figura 2.19 – Representação de uma curva típica obtida no DSC: I – transição vítrea, II – temperatura de cristalização, III – temperatura de fusão e IV – processo oxidativo (Bernal *et al.*, 2002)

O DSC pode fornecer informações a respeito de medidas específicas e de caracterização da amostra. Mudanças na linha de base de uma curva de DSC significam mudanças de fase, principalmente com relação a temperatura de transição vítrea ( $T_g$ ) da amostra. Esta temperatura é referente à mudança do estado vítreo mais ordenado para um estado de maior flexibilidade e menos ordenado. Para temperaturas abaixo da  $T_g$ , a amostra está no estado vítreo não possuindo energia interna necessária para o deslocamento de uma cadeia relativa à outra devido a mudanças de conformação. Vale salientar que, a altura de um pico é proporcional ao tempo de permanência em uma dada temperatura (Canevarolo, 2003). Bernal *et al.* (2002) verificaram que diversos fatores são importantes para a obtenção de resultados para o DSC. No entanto, alguns parâmetros relacionados à manipulação pelo operador, entre outros fatores relativos às propriedades físico-químicas da amostra, não podem ser controlados. Porém, estes precisam ser igualmente reportados para garantir a reprodutibilidade dos resultados.

Estudos realizados com o auxílio do DSC mostram que o mesmo pode ser uma ferramenta útil para avaliação de propriedades físicas do CAP, assim como de polímeros e de outros aditivos. Bringel (2007) utilizou o DSC para análise de CAP modificado com os polímeros Estireno-Butadieno-Estireno (SBS) e Etileno Acetato de Vinila (EVA), além de três outros aditivos: (i) óleo extensor, (ii) cal hidratada e (iii)

LCC. Verificou-se uma diminuição da  $T_g$  acarretando uma melhoria nas propriedades do CAP a baixas temperaturas para os dois polímeros, além dos aditivos óleo extensor e cal hidratada. Contudo, não houve influência do LCC na  $T_g$  à baixas temperaturas, sendo necessária a verificação de tal fenômeno em uma faixa de temperatura maior.

Mothé (2009), com auxílio do DSC, calculou a porcentagem de Frações Cristalizáveis (FC) para cinco tipos de CAP: (i) CAP 40, (ii) CAP + 3% SBS, (iii) CAP + 0,5% Ácido Polifosfórico (PPA), (iv) CAP + 1% PPA e (v) CAP + 3% de anidrido maléico. Verificou-se que o CAP 40 apresentou maior valor de FC (7,2%) podendo ocasionar, a baixas temperaturas, a formação de trincas térmicas no pavimento.

Bringel (2007) e Alencar (2009) constataram, através do uso do DSC, que o LCC apresentou dois eventos: (i) um pico exotérmico, relacionado à cura residual de material polimérico proveniente do processo de aquecimento utilizado para extração do LCC e (ii) um pico endotérmico, associado a mudanças químicas ou perda de voláteis.

### **2.9.3. Termogravimetria (TG)**

A análise termogravimétrica (TGA) ou termogravimetria (TG) é uma técnica que analisa a variação de massa de uma amostra (ganho ou perda) resultante de uma transformação química em função do tempo e/ou temperatura. Esta técnica permite o acompanhamento das seguintes reações: desidratação, combustão, decomposição e oxidação de polímeros e CAP. A TG tem-se mostrado uma ferramenta útil para analisar separadamente os efeitos resultantes do envelhecimento simulado nos testes tradicionais devido a execução de dois ensaios separados, com o auxílio de oxigênio e gás inerte. Esta técnica ainda apresenta como vantagens um rápido período de resposta e uma pequena exigência com relação ao tamanho da amostra (10mg). Três métodos de TG são comumente usados:

- Termogravimetria isotérmica: a massa da amostra é armazenada em função do tempo em temperatura constante, observando-se maior taxa de variação de massa para maiores temperaturas (Figura 2.20).



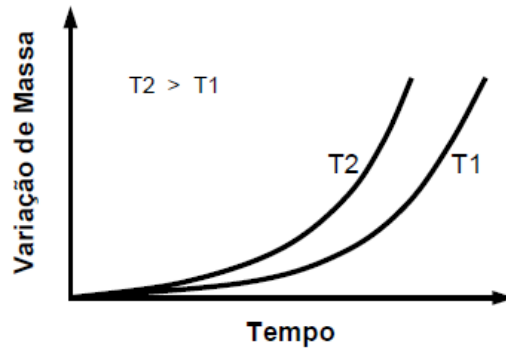


Figura 2.20 – Termogravimetria isotérmica (Mothé, 2009)

- Termogravimetria semi-isotérmica: a massa da amostra é aquecida a uma razão de aquecimento linear enquanto não houver variação de massa. A temperatura permanece constante até a obtenção de um novo patamar de variação de amostra e assim sucessivamente (Figura 2.21).

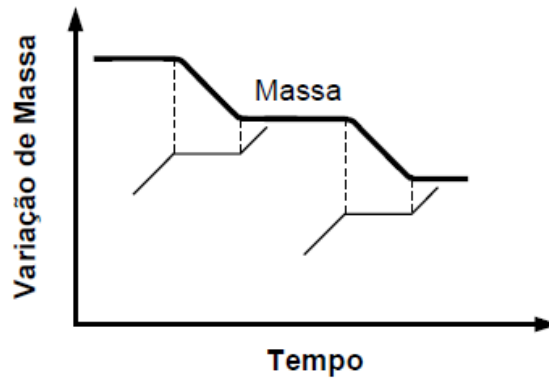


Figura 2.21 – Termogravimetria semi-isotérmica (Mothé, 2009)

- Termogravimetria convencional ou dinâmica: a amostra é resfriada ou aquecida num ambiente cuja temperatura sofre variação de maneira pré-determinada a uma razão de resfriamento ou aquecimento linear (Figura 2.22).

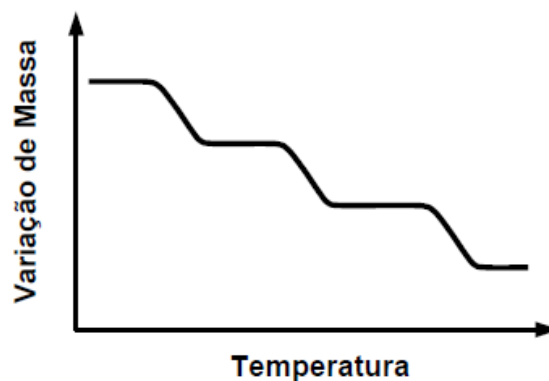


Figura 2.22 – Termogravimetria convencional ou dinâmica (Mothé, 2009)

Silva *et al.* (2002), com auxílio da TG, analisaram CAPs modificados com os seguintes polímeros: SEBS (Estireno-Etileno-Buteno-Estireno), PEAM (Polietileno Modificado com Anidrido Maléico) e duas amostras de SBS (uma de estrutura linear e outra de estrutura radial). Foram observados os seguintes eventos: temperaturas de cristalização ( $T_c$ ) e de fusão ( $T_m$ ) para a amostra de PEAM, temperatura de oxidação ( $T_{oxid}$ ) para as duas amostras de SBS (decorrente da presença das ligações duplas) e a  $T_g$  para todas as amostras analisadas. Lima *et al.* (2005) utilizaram a TG para analisar alguns constituintes da borracha adicionada ao CAP. Constatou-se que a borracha adicionada ao CAP apresentou 30% de negro de fumo em atmosfera oxidante até 700°C. Fernandes *et al.* (2009) analisaram um CAP modificado com 1% de PPA e observaram a mesma quantidade de eventos em atmosfera oxidativa ( $O_2$ ) e em atmosfera inerte ( $N_2$ ).

### 2.9.5. Viscosidade

A viscosidade é uma propriedade referente à resistência à deformação de um fluido devido à resistência ao escoamento, ou seja, é o resultado do atrito interno contra a fluidez. Quanto maior a viscosidade, menor será a velocidade de movimento do fluido. A Figura 2.23 (DNER, 1996) mostra um fluido viscoso aderente a duas placas paralelas de vidro com área ( $A$ ) para cada uma delas e uma distância ( $D$ ) entre as mesmas. Mantendo uma das placas fixa, aplica-se na outra placa uma força tangencial ( $F$ ) num intervalo de tempo  $\Delta t$  de maneira a percorrer um espaço  $\Delta x$ . Observa-se que o fluido sofre cisalhamento, ou seja, uma deformação cuja velocidade é definida pela razão  $\Delta\gamma/\Delta t$ , no qual  $\Delta\gamma$  é o deslocamento percorrido na distância  $D$ . A relação entre a força tangencial ( $F$ ) e a área ( $A$ ) na qual esta força é aplicada, é definida como tensão de cisalhamento ( $\tau$ ). O coeficiente de viscosidade ou simplesmente viscosidade ( $\eta$ ) é definido como sendo a relação entre a tensão de cisalhamento ( $\tau$ ) e a velocidade de deformação ( $\Delta\gamma/\Delta t$ ) (Equação 2.6). Um fluido será denominado de Newtoniano quando a relação existente entre tensão e taxa de cisalhamento for linear.

$$\eta = \frac{\tau}{\Delta\gamma/\Delta t} \quad (2.6)$$

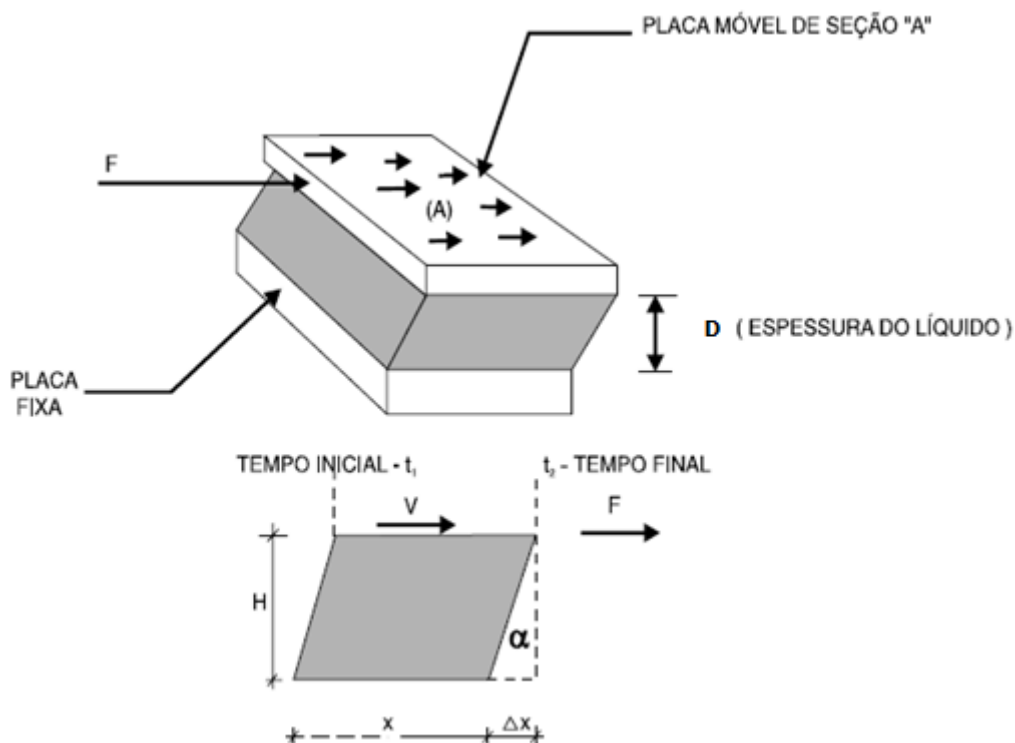


Figura 2.23 – Representação do escoamento de um fluido Newtoniano (DNER, 1996)

As misturas asfálticas geralmente são produzidas em temperaturas elevadas. Valores de temperatura maiores do que  $160^{\circ}\text{C}$  são comuns e imprescindíveis para a obtenção de uma viscosidade apropriada do CAP na mistura, de maneira a garantir o recobrimento do agregado mineral e a compactação, especialmente para CAPs muito viscosos ou contendo aditivos. Contudo, temperaturas elevadas acarretam riscos como: formação de fumos excessivos de CAP relacionados à segurança operacional, possível separação térmica entre CAP e polímero e excessiva oxidação do CAP (Larsen *et al.*, 2004).

O viscosímetro rotacional ou Brookfield, é o equipamento utilizado para avaliação da trabalhabilidade de CAP em temperaturas elevadas. A viscosidade é medida através do torque necessário para girar uma haste (também designada de *spindle*) imersa em uma amostra de CAP aquecida, a velocidade constante (Figura 2.24). Normalmente, utilizam-se as temperaturas de:  $135^{\circ}\text{C}$ ,  $150^{\circ}\text{C}$  e  $175^{\circ}\text{C}$  para a caracterização do CAP, quando o mesmo age aproximadamente como um fluido viscoso.

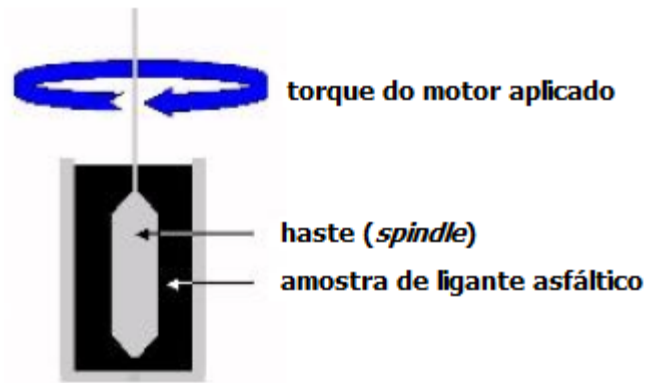


Figura 2.24 – Esquema de funcionamento do viscosímetro Brookfield® (Rhode, 2007)

O CAP deve ser manipulado e estocado à menor temperatura possível em relação à fluidez suficiente ao seu uso, tendo em vista que a viscosidade deve estar apropriada para a operacionalidade das ações imprescindíveis aos procedimentos de mistura em linha ou mudança para os sistemas de transportes. A viscosidade do CAP tem importância fundamental na compactação. Uma viscosidade elevada dificulta a movimentação dos agregados durante a rolagem. Quando a viscosidade é baixa, os agregados movimentam-se com maior mobilidade durante a compactação, contudo não há coesão suficiente para manter estas partículas na posição uma vez finalizada a compactação. O aumento da viscosidade por oxidação do CAP faz com que o mesmo se torne mais frágil (quebradiço) afetando seu desempenho perante esforços repetitivos (Pereira, 2010).

Para a caracterização da viscosidade e do comportamento elástico do CAP convencional e/ou modificado, é utilizado o Reômetro de Cisalhamento Dinâmico (*Dynamical Shear Reometer* - DSR). Este equipamento é provido de duas placas paralelas (uma oscilante e outra fixa). A amostra de CAP é colocada entre essas placas no qual submete-se a pulsos de carga cisalhantes (Figura 2.25).

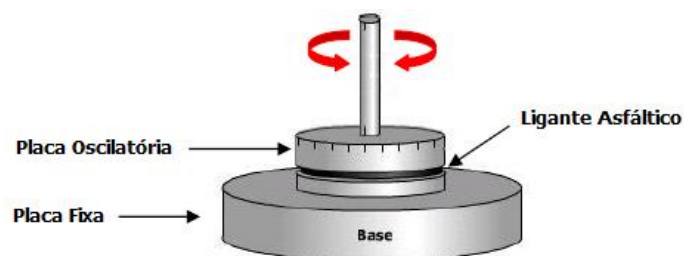


Figura 2.25 – Reômetro de Cisalhamento Dinâmico (DSR) (Rohde, 2007)

Os resultados obtidos através desse ensaio permitem a determinação de duas importantes variáveis: o módulo complexo de cisalhamento ( $G^*$ ) e o ângulo de fase ( $\delta$ ). O  $G^*$  simboliza a resistência total do CAP à deformação quando submetido a repetidos pulsos de tensões cisalhantes. O  $G^*$  é formado por dois componentes: o módulo de armazenamento ou elástico ( $G'$ ) e o módulo de perda ou viscoso ( $G''$ ) (Figura 2.26).

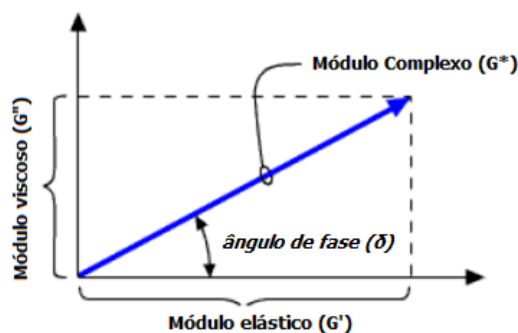


Figura 2.26 – Ângulo de fase e módulo complexo (Rohde, 2007)

Para os materiais elásticos, o carregamento aplicado é coincidente com a resposta imediata da deformação não existindo atraso. Os materiais viscosos possuem um intervalo de tempo entre o carregamento e a resposta, caracterizado por um ângulo de fase próximo a  $90^\circ$ . O CAP é caracterizado como um material viscoelástico cujo ângulo de fase varia entre  $0^\circ$  (baixas temperaturas) e  $90^\circ$  (altas temperaturas) (Figura 2.27) (Bernucci *et al.*, 2007).



Figura 2.27 – Exemplos de resultados de ângulo de fase para dois tipos de CAP (Bernucci *et al.*, 2007)

As especificações Superpave (*Superior Performing Asphalt Pavements*) definem e estabelecem valores para as relações entre  $G^* \times \text{sen}\delta$  e  $G^*/\text{sen}\delta$ . O parâmetro  $G^*/\text{sen}\delta$  é utilizado para avaliar o comportamento do material em temperaturas elevadas ( $>46^\circ\text{C}$ )

quanto à deformação permanente e o  $G^* \times \text{sen}\delta$  é utilizado para avaliar o comportamento do material em temperaturas intermediárias (7°C e 34°C) como indicativo da resistência à fadiga (Bernucci *et al.*, 2007).

Alguns parâmetros reológicos tais como o módulo complexo ( $G^*$ ) e o ângulo de fase ( $\delta$ ), podem ser dispostos em escala log-log originando uma curva mestra conforme apresentado na Figura 2.28.

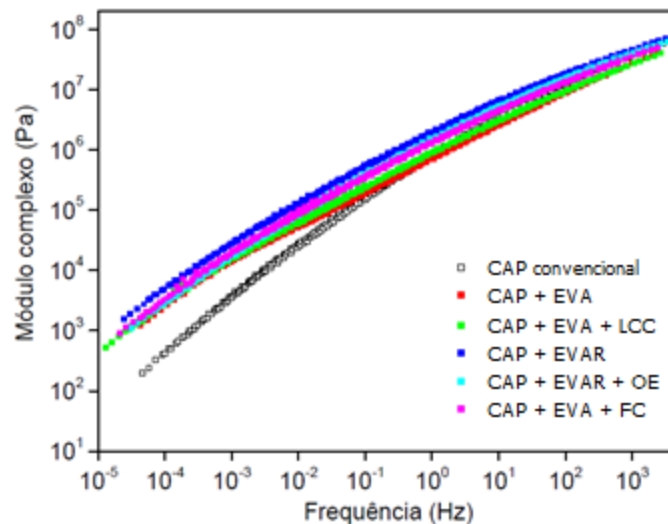


Figura 2.28 – Exemplo de representação de uma curva mestra (Alencar, 2009)

A obtenção de propriedades reológicas de materiais quando submetidos a carregamentos, demandam muito tempo. A curva mestra é uma verificação das propriedades reológicas do CAP em um ensaio com curto período de duração. Tal procedimento baseia-se no princípio de variáveis reduzidas ou Princípio da Superposição Tempo-Temperatura (PSTT) no qual há equivalência entre estes dois fatores, ou seja, o tempo e a temperatura possuem o mesmo efeito sobre as propriedades reológicas do material (Bechara *et al.*, 2008).

Para a construção de uma curva mestra, é necessário, inicialmente, coletar dados referentes a ensaios dinâmicos, realizados em faixas de frequência e de temperatura na região de viscoelasticidade linear do material. As curvas referentes às outras temperaturas são transportadas horizontalmente na escala do tempo de modo que todas as curvas se ajustem em uma única curva de referência. Efetua-se esse transporte através de uma função designada de fator de deslocamento, conversão ou *shift factor* representada por  $a_{[T]}$  (Figura 2.29). Um gráfico de  $\log a_{[T]}$  versus temperatura é

produzido em conjunto com a curva mestra no qual o mesmo é um indicativo visual da variação das propriedades reológicas de um material viscoelástico em função da temperatura (Bechara *et al.*, 2008).

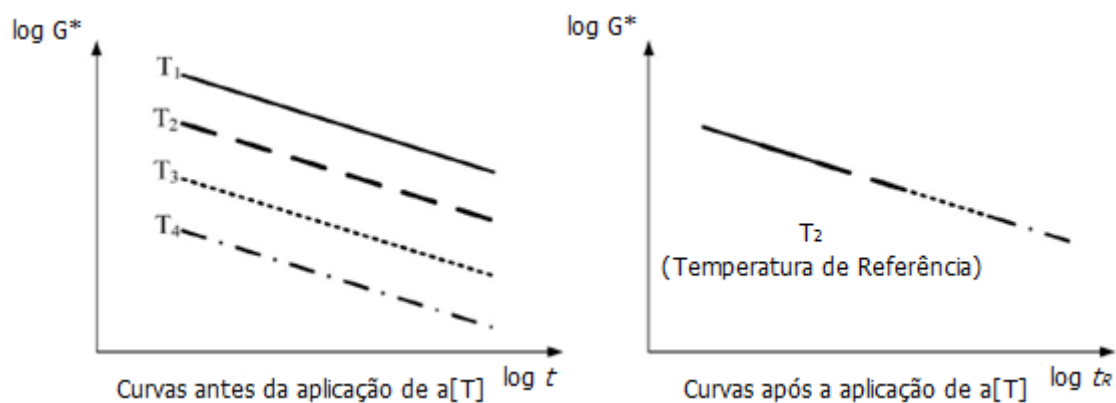


Figura 2.29 – Transporte de curvas para construção da curva mestra (Chompoorat e Likitlersuang, 2009)

Alencar *et al.* (2008) avaliaram, através de curvas mestras, CAP convencional 50/70 e modificado com os seguintes aditivos: CAP + 4% EVA + 2% LCC e CAP + 4% EVA. Tomando como referência a temperatura de 25°C e utilizando o princípio da superposição tempo-temperatura, foi verificado que, para todas as amostras de CAP modificado, houve um aumento no  $G^*$  em temperaturas elevadas e uma pequena diminuição no  $G^*$  em baixas temperaturas.

Rodrigues (2010) construiu curvas mestras utilizando a  $T_R$  de 60°C para CAP convencional 50/70 e modificado com os seguintes aditivos: (i) CAP + 3% SBS, (ii) CAP + 4% SBS, (iii) CAP + 4,5% SBS, (iv) CAP + 3% SBS + 1% LCC, (v) CAP + 4% SBS + 1% LCC e (vi) CAP + 4,5% SBS + 1% LCC. Os resultados indicaram que a adição de LCC em todas as amostras proporcionou uma redução no valor de  $G^*$  em relação ao CAP modificado apenas com SBS. Rodrigues (2010) afirmou que este fenômeno deve-se ao fato do LCC promover a solubilização de parte da fração asfáltica provocando a diminuição da viscosidade e modificando as propriedades reológicas do CAP.

## **2.10. Ensaio para Avaliação da Resistência ao Dano por Umidade em Misturas Asfálticas**

A ação deletéria da água em revestimentos motivou o desenvolvimento de procedimentos laboratoriais com o intuito de quantificar ou prever o desempenho do material em campo sob essas condições. Solaimanian *et al.* (2003) e Liberatori e Constantino (2006) classificaram esses procedimentos em duas principais categorias: qualitativos e quantitativos. Moura (2001) classificou tais procedimentos em dois grupos: através de métodos de avaliação de adesividade por análise visual e através de métodos de avaliação de adesividade por análise do comportamento mecânico de misturas asfálticas. Serão discutidos nesse item alguns dos principais procedimentos laboratoriais utilizados para avaliação da resistência ao dano por umidade em misturas asfálticas.

### **2.10.1. Ensaio Lottman Original**

Esse método de avaliação do efeito deletério da água em pavimentos foi desenvolvido por R. P. Lottman em 1978 na Universidade de Idaho nos Estados Unidos. Esse método utilizava grupos de Corpos de Prova (CPs) secos e condicionados. O condicionamento consistia na aplicação de saturação à vácuo por 30 minutos, seguidos por mais 30 minutos em pressão atmosférica. Em seguida, os CPs eram congelados a uma temperatura de  $-18^{\circ}\text{C}$  durante 15 horas e transferidos posteriormente para um banho maria a  $60^{\circ}\text{C}$ . Solaimanian *et al.* (2003) afirmaram que Lottman havia estabelecido um condicionamento alternativo no qual cada ciclo completo tinha a duração de 8 horas, totalizando 18 ciclos de condicionamento. Lottman chegou a conclusão de que tal procedimento era bastante severo. Os CPs dos grupos condicionado e não condicionado eram rompidos a tração indireta com uma velocidade de carregamento de  $0,16\text{cm}/\text{min}$  à temperatura de  $12^{\circ}\text{C}$  e a  $0,38\text{cm}/\text{min}$  à temperatura de  $23^{\circ}\text{C}$ .

Cada um dos três níveis de condicionamento propostos por Lottman representava um período de vida do pavimento. Assim, os CPs que não são submetidos ao condicionamento representam o pavimento recém construído, curado e compactado que não sofrera ainda a ação de fatores externos. A circunstância na qual o revestimento sofre a ação deletéria na presença de água é referente à saturação a vácuo, enquanto os



efeitos relacionados à saturação a vácuo, aliados aos ciclos de condicionamento térmico, representam os danos ocasionados pelo tráfego e pelo intemperismo.

Para a elaboração desse procedimento, entre 1975 e 1977, *Lottman* analisou o desempenho de mais de 2400km de trechos rodoviários distribuídos em oito estados americanos. Foram restaurados em laboratório os traços referentes ao revestimento e, em seguida, submetidos ao procedimento descrito segundo este método. Comparando-se o desempenho em pista desses trechos, *Lottman* chegou a um critério mínimo de aceitabilidade de 70% para a perda de resistência no ensaio de Resistência à Tração (RT). Dessa forma, uma perda de resistência superior a 30% ocasionaria um desempenho indesejado em campo para a mistura asfáltica. Contrariamente, quando uma mistura apresentasse uma perda inferior a 30%, esta não apresentaria problemas de adesividade. Com relação ao desempenho da mistura asfáltica em campo, *Lottman* ressaltou que os valores de RT referentes ao grupo não condicionado simulavam o efeito da adesividade nas propriedades mecânicas num período de dois a quatro anos. Para o grupo condicionado, *Lottman* estimou que os valores de RT representavam um período de quatro a doze anos de previsão de desempenho.

### **2.10.2. Ensaio *Lottman* Modificado**

O ensaio *Lottman* modificado é o teste para verificação da suscetibilidade a umidade de misturas asfálticas mais utilizado no Brasil, e de uso disseminado internacionalmente. Normatizado pela AASHTO T 283. O ensaio *Lottman* modificado é amplamente utilizado para avaliar o potencial de deslocamento da película de CAP de uma mistura asfáltica a quente e prever considerando-se um prazo de quatro a doze anos, a suscetibilidade da mistura asfáltica ao dano por umidade.

Esse ensaio, embora similar, é uma alteração referente ao ensaio *Lottman* original descrito anteriormente. A principal alteração está na aplicação do vácuo até que se atinja um grau de saturação entre 55 e 80% ao invés da aplicação durante 30 minutos como era feito no ensaio *Lottman* original. Solaimanian *et al.* (2003) mencionaram que outra mudança entre os dois testes está na temperatura e na taxa de carregamento de  $1,65 \times 10^{-3}$  m/min à 12,8°C para 0,051 m/min à 25°C. Estes autores afirmam, também, que estes valores de taxa de carregamento e de temperatura foram elevados de modo a permitir que a prensa Marshall, disponível na maioria dos laboratórios, pudesse ser

utilizada. Os valores de 25°C para a temperatura de ensaio de acordo com os mesmos autores, também eliminaria a necessidade de resfriamento do sistema de carregamento.

Para a realização desse ensaio, molda-se, no mínimo, seis CPs com 1200g de mistura asfáltica com Vv entre 6 e 8%. Para CPs moldados conforme o método Marshall, é necessário a moldagem com diferente número de golpes. Tal procedimento é feito a partir de um gráfico (número de golpes *versus* Vv) no qual obtêm-se a quantidade de golpes necessários para a obtenção do Vv entre 6 e 8%. Para CPs moldados de acordo com o método Superpave, acompanham-se as alturas dos CPs e, dessa maneira, estima-se o número de giros necessários para a obtenção do Vv entre 6 e 8% compactados no teor de projeto.

Os CPs são divididos em dois grupos de três CPs cada. Um grupo denominado de grupo condicionado, é submetido à saturação a vácuo a uma pressão entre 250-650mmHg de 5 a 10 minutos, de modo a alcançar um grau de saturação dos vazios entre 55 e 80%. Em seguida, os CPs deste grupo são submetidos a um ciclo de congelamento a -18°C e por um ciclo de aquecimento a 60°C em banho maria por 24h. Retiram-se os CPs do banho maria para imersão em um banho a 25°C por um período de 2±1h. Realiza-se o ensaio de RT (DNER-ME138/1994) para o outro grupo cujos CPs não foram submetidos ao condicionamento (grupo não condicionado) e, em seguida, para o grupo condicionado. Calcula-se a RRT definida como a razão entre a RT do grupo condicionado e a RT do grupo não condicionado (Figura 2.30).

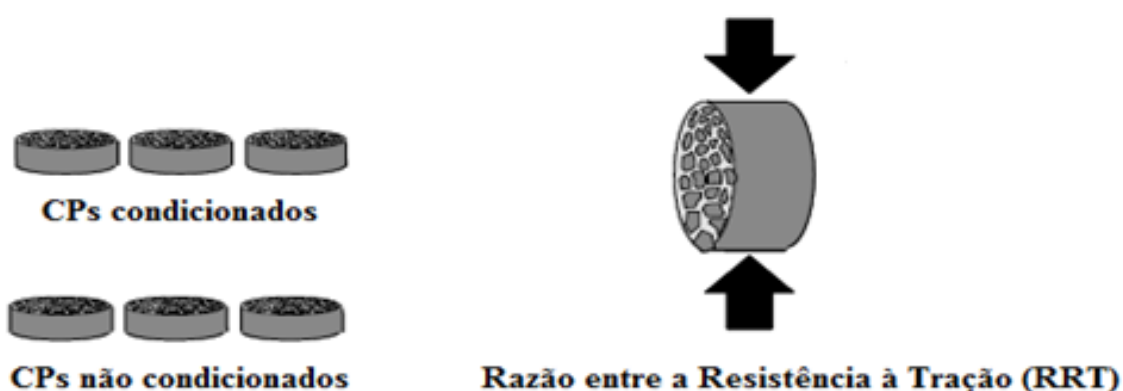


Figura 2.30 – Razão entre a Resistência à Tração (RRT) para CPs condicionados e não condicionados conforme AASHTO T283/99 (Solaimanian *et al.*, 2003)

O critério de aceitação para misturas não suscetíveis à umidade de acordo com a AASHTO T 283 (1989) é de  $RRT \geq 70\%$ . No entanto, a versão AASHTO T 283 (1999)

compatibilizada para a metodologia Superpave adota o critério de  $RRT \geq 80\%$ . Hicks (1991) considerou suscetível ao dano por umidade misturas asfálticas com  $RRT$  inferior a 70%. Alguns estudos foram realizados adotando esse valor (Furlan *et al.*, 2004; McCann *et al.*, 2005; Moizinho, 2007; Rohde, 2007; Tavares *et al.*, 2007; Barra, 2009; Kok e Yilmaz, 2009). Entretanto, o que existe é uma razão ou limite de separação com objetivo de classificar as misturas suscetíveis ao dano por umidade, demonstrado pela comparação com informações de pavimentos em serviço (Furlan, 2006).

### **2.10.3. Condicionamento Tunncliff & Root**

Este ensaio foi desenvolvido por Tunncliff & Root em 1984 e posteriormente normatizado pela *American Society for Testing and Materials* (ASTM). Esse método é similar ao procedimento da AASHTO T 283 sendo a principal diferença a não adoção do ciclo de congelamento (Tabela 2.5). Entretanto, há controvérsias com relação ao critério de aceitabilidade para esse método. Moura (2001) afirma que misturas asfálticas que apresentem um  $RRT$  mínimo de 80% terão bom desempenho em campo. Furlan *et al.* (2004), Gouveia *et al.* (2004) e Furlan (2006) adotaram um  $RRT \geq 70\%$  como critério de aceitabilidade. Todavia vale ressaltar que, assim como no procedimento da AASHTO, não há informação a respeito desse critério no procedimento descrito pela ASTM D 4867 (1996).

Tabela 2.5 – Procedimentos relativos aos ensaios de avaliação do dano por umidade  
(Gouveia *et al.*, 2004)

Norma	Características do Conjunto de CPs	Características do Condicionamento	Absorção e Envelhecimento	Critério de Aceitação
ASTM D 4867	n = 6 CPs Marshall V <sub>v</sub> = 7±1% ou do campo	Vácuo: 500mmHg por 5min Saturação: 55-80% Ciclo Térmico: 1) Congelamento: não há 2) Aquecimento: 60°C por 24h 3) Imersão (opcional): 25°C por 1h	Absorção: Temperatura de mistura por 2h Envelhecimento: não há	RRT ≥ 70%
AASHTO T 283	n = 6 CPs Marshall V <sub>v</sub> = 7±1% ou do campo	Vácuo de 500mmHg por 5-30 min ou até atingir saturação: 55-80% Ciclo Térmico: 1) Congelamento: -18°C por 16h 2) Descongelamento: 60°C por 24h 3) Imersão: 25°C por 2h	Absorção: Não há Envelhecimento: Mistura não compactada, 60°C por 16h	RRT ≥ 80%

Moura (2001) afirma que o condicionamento Tunnicliff & Root apresenta a vantagem de verificar problemas de adesividade entre CAP /agregados em curto prazo: zero a quatro anos. Furlan *et al.* (2008) compararam os ensaios descritos pelas normas ASTM D4867/96 e AASHTO T 283/99 e constataram que o grau de severidade do ensaio normatizado pela ASTM é menor do que aquele do ensaio descrito pela AASHTO.

#### 2.10.4. Simulador Hamburg

O simulador de tráfego de laboratório *Hamburg* (*Hamburg Wheel Tracking Device*, em inglês) foi desenvolvido em 1970 por Esso A. G. em *Hamburg*, Alemanha. Normatizado pela AASHTO T 324, este equipamento analisa os efeitos combinados da deformação permanente e da ação deletéria da água.

Os CPs utilizados neste ensaio são placas compactadas por amassamento com V<sub>v</sub> = 7±1% e com as seguintes dimensões: 26cm × 32cm e espessura de 4cm. O ensaio é

realizado imergindo a placa em água quente com temperatura variando entre 20°C e 70°C, sendo usualmente utilizada a temperatura de 50°C. Uma roda de aço de largura de 47mm movimenta-se indo e voltando sob a placa aplicando uma carga de 705N. O critério de parada da roda é equivalente a 20mm de deformação ou quando o limite de 20.000 ciclos é atingido (Moura, 2010) (Figura 2.31).



Figura 2.31 – Simulador de tráfego de laboratório *Hamburg* (Moura, 2010)

O resultado típico da utilização desse simulador pode ser visto na Figura 2.32, no qual se visualiza: (i) pós-compactação, (ii) ponto de inflexão, (iii) curva de fluência e (iv) curva de *stripping*. A curva de fluência tem relação com a deformação permanente devido à fluência plástica que é o inverso da taxa de deformação na região linear na curva de deformação, e é iniciada no fim da pós-compactação. O ponto de inflexão caracteriza a resistência da mistura ao dano por umidade. Logo em seguida, inicia-se a curva de *stripping* indicando a severidade do efeito deletério da água, prosseguindo até o final do ensaio.

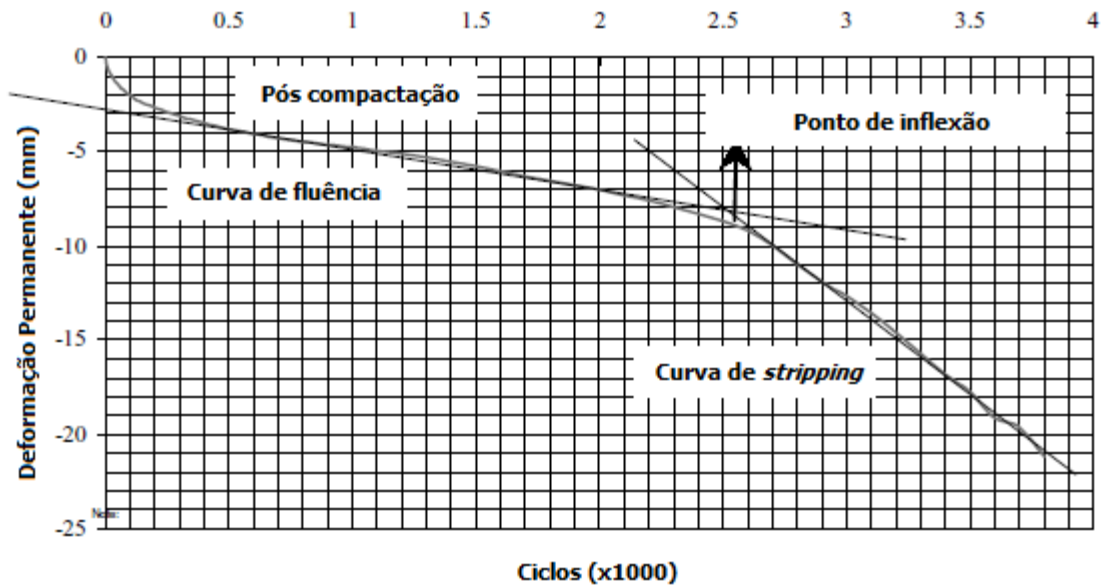


Figura 2.32 – Resultados do ensaio com o simulador de tráfego de laboratório *Hamburg* (Solaimanian *et al.*, 2003)

Solaimanian *et al.* (2003) afirmam que, para revestimentos o ponto de inflexão deve ser maior do que 10.000 ciclos. Os autores afirmam ainda que, para revestimentos com tempo de serviço de um ano, o ponto de inflexão deve ser inferior a 3.000 ciclos. Embora o simulador *Hamburg* venha se mostrando promissor, ele apresenta algumas desvantagens tal como não fornecer uma propriedade fundamental que possa ser utilizada para fins de modelagem. Os valores recomendados para climas específicos e níveis de tráfego também não estão disponíveis. Este ensaio também simula o mecanismo de *stripping* que acontece quando a chuva ocorre durante a época quente do ano. Portanto, a escolha da temperatura de ensaio deve ser feita a partir da época mais quente do ano, não sendo recomendável a realização do ensaio para temperaturas equivalentes a climas frios (Solaimanian *et al.*, 2003).

#### 2.10.5. Ensaio de Imersão Química

O ensaio de imersão química normatizado pela DNER ME 79 (1994), consiste em verificar a adesão entre o CAP e os agregados através de aquecimento do agregado recoberto em solução contendo água destilada e carbonato de sódio ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ). Aumenta-se a concentração de carbonato de sódio na solução e numera-se as soluções de 0 a 9 (Tabela 2.6). O valor 0 é referente a água destilada pura, o 1 é referente a solução de 0,42g de carbonato de cálcio em um litro de água e o 9 corresponde a mais elevada concentração que equivale a 107,52g de  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  em um litro de água. Entre as

soluções de 1 a 9, cada aumento do número corresponde ao dobro da concentração de carbonato de cálcio. O número referente à solução que não houver mais formação de filme de CAP sobre os agregados e apresentar apenas pingos ou manchas de CAP corresponderá ao valor da adesividade.

Tabela 2.6 – Solução de carbonato de sódio para ensaio de adesividade por fervura  
(Adaptado de DNER-ME 79/1994)

Nº da Solução	Concentração(g) de Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> por litro de água (g/L)	Adesividade
0	0	Má
1	0,42	Satisfatória
2	0,84	Satisfatória
3	1,68	Satisfatória
4	3,36	Boa
5	6,72	Boa
6	13,44	Boa
7	26,88	Boa
8	53,76	Boa
9	107,52	Boa

De acordo com o método de ensaio DNER-ME 79 (1994), o conceito de adesividade também poderá ser dado por dois números que significarão que o deslocamento começou no primeiro número e terminou no segundo. Outro procedimento para verificação da adesividade em agregados é feito isoladamente utilizando apenas agregados graúdos e normatizado pelo DNER-ME 078 (1994). Esse ensaio é realizado colocando a mistura CAP/agregados em contato com a água destilada, a 40°C por um período de 72 horas. O resultado é determinado pelas seguintes circunstâncias: (i) satisfatório quando não houver nenhum deslocamento do filme de CAP ao fim de 72 horas e (ii) insatisfatório quando houver deslocamento total ou parcial do filme de CAP no mesmo período de tempo. Entretanto, Bernucci *et al.* (2007) ressaltam que, mesmo que os agregados apresentem resultados satisfatórios, não há garantia de que a mistura apresente bom comportamento com relação ao efeito deletério da água por este ensaio ser empírico e não representar todos os mecanismos de descolamento.

### 2.10.6. Desgaste Cântabro

O ensaio de desgaste Cântabro é normatizado pelo método de ensaio DNER-ME 383 (1999) permitindo avaliar, de maneira indireta, a resistência à desintegração de misturas asfálticas. Este ensaio utiliza o equipamento de abrasão *Los Angeles* (sem a utilização das esferas de aço) ao qual se submete o CP compactado pelo método Marshall de misturas drenantes ou porosas com Vv entre 18 e 25%, a 300 revoluções a uma velocidade de 33rpm e à temperatura de 25°C (Figura 2.33). Após as 300 revoluções, retira-se o CP e o material desprendido, determina-se o peso do CP ( $P'$ ) em relação ao peso original ( $P$ ) de modo a obter o desgaste da mistura asfáltica ( $A$ ) conforme a Equação 2.7.

$$A = \frac{P-P'}{P} \times 100 \quad (2.7)$$

Onde:

$A$  – desgaste da mistura asfáltica, com aproximação de 1%;

$P$  – Peso do CP, antes do ensaio;

$P'$  – Peso do CP, após o ensaio.



Figura 2.33 – Equipamento de abrasão *Los Angeles* utilizado para o ensaio de desgaste Cântabro

O desgaste da mistura betuminosa é a média aritmética de três ensaios realizados para CPs com mesmo teor de CAP. Moreira (2009) analisou através deste ensaio uma mistura asfáltica dosada pelo método Marshall constituída de CAP 50/70 e agregados minerais (seixo e areia) e obteve um desgaste de 2%. Bock (2009) analisou misturas asfálticas constituídas de: (i) CAP 50/70, (ii) agregados basálticos, (iii) dosadas pelo método Marshall e (iv) com diferentes métodos de adição de cal (cal/ fíler, cal/agregado seco, cal/agregado úmido e cal/calda). Este autor verificou que a mistura com cal sob a forma de fíler apresentou desgaste de 9%, a mistura com cal adicionada ao agregado



seco apresentou desgaste de 11% e as misturas com agregado úmido e com cal em forma de calda apresentaram desgaste de 7%. A norma DNER-ME 383 (1999) estabelece como limite de aceitação, um valor inferior a 25% de desgaste para misturas asfálticas drenantes. Não há, portanto, limite de aceitação para misturas asfálticas densas (Moura, 2001; Moizinho, 2007; Bock, 2009; Budny, 2009; Moreira, 2009; Granich, 2010; Freitas, 2010).

### **2.10.7. Módulo de Resiliência (MR)**

A degradação estrutural dos revestimentos asfálticos está associada ao somatório da deformação plástica com as deflexões elásticas repetidas. A deflexão recuperável em um pavimento de camadas múltiplas está intimamente relacionada com as propriedades elásticas de suas camadas e de seu subleito. Para se estudar as características de deformabilidade dos materiais que compõem a estrutura dos pavimentos rodoviários flexíveis em condições de carregamento cíclico, utiliza-se o Módulo de Resiliência (MR). O MR de misturas asfálticas é definido como a razão entre a tensão de tração e a correspondente deformação específica recuperável, quando as misturas são submetidas a carregamentos cíclicos de baixa duração.

Os primeiros estudos a respeito do MR foram iniciados na década de 1950 com Francis Hveem (Bernucci *et al.*, 2007). O termo resiliência significa energia armazenada em um corpo deformado elasticamente, que é devolvida quando cessam as tensões causadoras das deformações; ou seja, é a energia potencial de deformação (Medina, 1997; Bernucci *et al.*, 2007). A determinação do MR, em CPs moldados em laboratório ou obtidos em campo, pode ser feita por meio da Equação 2.8.

$$MR = \frac{P_{cíclica}}{\Delta H_{inst}} (0,27 + \mu_{ins}) \quad (2.8)$$

Onde:

MR = módulo de resiliência do ciclo de ensaio, em MPa;

$P_{cíclica}$  = carga cíclica do ciclo de ensaio, em N;

$\Delta H_{ins}$  = deslocamento instantâneo horizontal do ciclo de ensaio, em mm;

t = altura do corpo de prova, em mm;

$\mu_{\text{ins}}$  = coeficiente de Poisson instantâneo ou resiliente.

O ensaio de MR é normatizado conforme o procedimento descrito na especificação rodoviária DNIT 135 (2010). Determina-se o RT por compressão diametral a uma temperatura de 25°C em no mínimo 3 CPs. O valor obtido será utilizado para determinar a carga máxima de ensaio cujo valor deve estar compreendido entre 10% e 20% de RT por compressão diametral médio obtido. A frequência de aplicação da carga tem duração de um minuto, sendo de 0,1s o tempo de aplicação da carga e 0,9s o tempo de repouso entre as aplicações. O CP deve ser mantido em câmara climatizada por um período mínimo de quatro horas a  $25\pm 0,5^\circ\text{C}$  antes da realização do ensaio.

O CP sofre deslocamentos horizontais os quais são medidos com auxílio de LVDT's (*Linear Variable Differential Transformers*) ligados a um sistema de aquisição de dados controlado por um computador. Realiza-se o pré-condicionamento do CP aplicando-se 50 ciclos de ensaio. Após a fase de pré-condicionamento, aplica-se, sem interrupção, cinco ciclos de ensaio adicionais. O valor do MR é obtido a partir da média dos resultados obtidos nos cinco ciclos de ensaio adicionais. A Figura 2.34 mostra o equipamento utilizado para a execução dos ensaios de MR.



Figura 2.34 – Equipamento utilizado para ensaio de MR em misturas asfálticas

Estudos realizados por Furlan *et al.* (2004), Gouveia *et al.* (2004), Furlan (2006), Zegarra (2007) e Pilati (2008), adotaram como parâmetro a Relação entre o Módulo de Resiliência (RMR) também designado de retenção de módulo de resiliência. Embora não exista nenhum critério estabelecido, o RMR consiste na comparação dos valores de MR para misturas antes e após o condicionamento com critério de aceitabilidade acima

de 70%. Gouveia *et al.* (2004) trabalharam com misturas asfálticas constituídas de CAP convencional e com dois tipos de agregados básicos: gábro e basalto. As misturas com gábro apresentaram RMR de 57% e as misturas com basalto RMR de 85%.

Furlan (2006) analisou misturas asfálticas com CAP 50/70, teor de CAP de projeto de 5,5% e constituídas de três tipos de agregados: basalto, granito e gábro. Os valores de RMR obtidos foram: 57%, 31% e 106% para as misturas com agregado de basalto, granito e gábro, respectivamente. Adotando-se o critério de aceitabilidade de 70% de RMR, as misturas com agregados basálticos e graníticos seriam consideradas suscetíveis ao dano por umidade e apenas a mistura com agregados gábricos seria considerada aceitável.

Zegarra (2007) estudou três tipos de CAP peruanos: CAP convencional 60/70, modificado com SBS (Tipo I 60/60) proveniente da empresa Tecnologia de Materiales (TDM) e modificado com SBS (PG 76-22) oriundo dos laboratórios da Betunelkoch Asfaltos e Tecnologia. Essas misturas asfálticas apresentaram RMR da ordem de 104% para a mistura com CAP 60/60 e RMR da ordem de 109% para as misturas com CAP modificado com SBS Tipo I 60/60 e PG 76-22. Vale ressaltar que em nenhum momento Zegarra (2007) mencionou o teor de SBS utilizado nas misturas.

Pilati (2008) ensaiou, além de uma mistura de referência com CAP 30/45 e teor de CAP de 5,5%, seis misturas contendo CAPs modificado com: 9% de borracha, 18% de borracha, 7% de óleo de xisto, 18% de borracha e 7% de óleo de xisto, 9% de borracha e 14% de óleo de xisto e 18% de borracha e 14% de óleo de xisto. A autora observou que o efeito da borracha sobre o RMR acarretou a diminuição desse parâmetro até a concentração de 14% e aumentou para as concentrações entre 14 e 18%. Para a mistura contendo CAP modificado com óleo de xisto, verificou-se que este aditivo propiciou um aumento até a concentração de 10% do RMR e uma diminuição deste parâmetro para concentrações maiores.

## **2.11. Ensaios para Avaliação da Energia de Superfície**

Conforme visto anteriormente, o efeito deletério da água em misturas asfálticas está relacionado a fenômenos físicos, químicos e mecânicos. A redução da adesão entre o par CAP/agregado e a perda de coesão dentro do próprio CAP na presença da água motivou numerosas pesquisas relacionadas a esse fenômeno durante as últimas décadas.

Entretanto, a maioria dos ensaios empregados são procedimentos de natureza empírica e de baixa correlação com o campo. Mais recentemente, teorias relacionadas à termodinâmica, energia de superfície, entre outros métodos analíticos, vêm sendo utilizadas para analisar o fenômeno do dano por umidade em misturas asfálticas (Caro *et al.*, 2008a). Alguns desses ensaios são descritos a seguir.

### 2.11.1. Placas de Wilhelmy (Wilhelmy Plates - WP)

O método das Placas de Wilhelmy (WP) é um método rápido e eficaz que consiste na determinação da energia de superfície para CAP baseado no equilíbrio cinético de forças. Os ângulos de contato do CAP são determinados mergulhando-se as placas cobertas com CAP em líquidos de referência, que possuem valores conhecidos de energias de superfície (Figura 2.35).

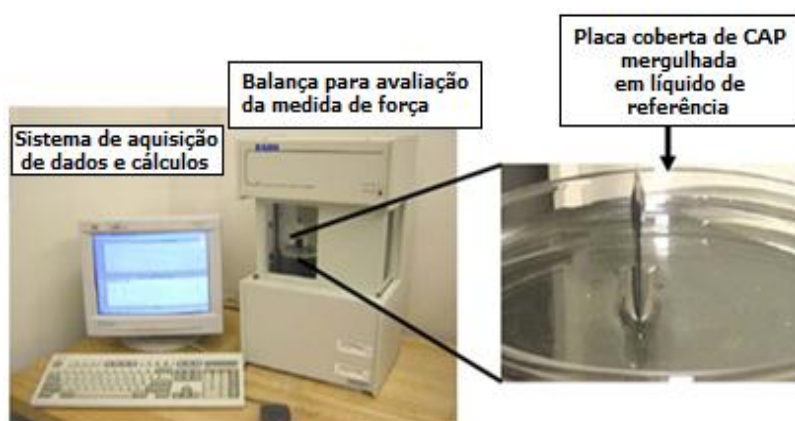


Figura 2.35 – Sistema dinâmico para obtenção da energia de superfície de CAPs  
(Zollinger, 2005)

Para a realização desse ensaio, são utilizadas 12 placas de vidro (50mm × 24mm × 0,15mm) limpas com acetona e água destilada. O CAP é aquecido até o estado líquido, a depender do PG do mesmo. Estando a placa seca, mergulha-se a placa no CAP até aproximadamente 30mm removendo-se em seguida. A placa coberta com o CAP é imersa e retirada lentamente, a uma velocidade constante, em um recipiente contendo um líquido de referência. O ângulo formado durante a imersão da placa coberta com CAP no líquido, é denominado de ângulo de contato de avanço e tem sido associado ao processo de *healing* ou seja, a reselagem de trincas no campo. O ângulo de contato formado durante a retirada da placa tem sido associado ao mecanismo de fratura e é designado de ângulo de contato de retrocesso, conforme apresentado na Figura 2.36.

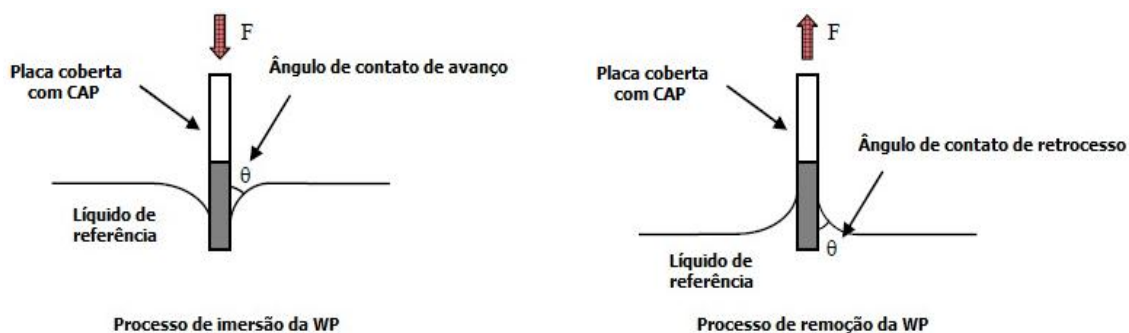


Figura 2.36 – Representação esquemática do método das Placas de Wilhelmy (Arambula, 2007)

A força aplicada à placa é influenciada pelo perímetro da placa, pela energia de superfície do líquido, pelo ângulo de contato entre a placa e o solvente e pelo volume da placa imersa. Segundo Zollinger (2005), são utilizados três tipos de líquidos de referência: água, glicerol e iodeto de metileno. Mede-se o ângulo de contato para cada um dos três solventes separadamente.

### 2.11.2. Dispositivo de Absorção Universal (*Universal Sorption Device - USD*)

O método utilizado para medir a energia de superfície de agregados baseia-se numa técnica de absorção estática de vapor denominada de Dispositivo de Absorção Universal (USD) (*Universal Sorption Device*, em inglês). Durante a imersão de um agregado limpo num líquido, é formada uma nova interface líquido-sólido, que se deve a mudança na energia total do sistema e a evolução de calor relacionado à entalpia de imersão que é responsável pela força da interação da superfície na interface líquido-sólido.

Nesse ensaio são utilizados aproximadamente 40g de agregados passantes na peneira nº4 e retidos na peneira nº8. Após serem lavados com água potável, os agregados são submetidos a um ciclo de lavagem com os seguintes solventes: água destilada, metanol, hexano e metanol novamente. Zollinger (2005) e Bhasin (2006) citam que o solvente metilpropilcetona pode ser utilizado como líquido de teste além da água e do hexano. O dispositivo de absorção universal é apresentado na Figura 2.37.



Figura 2.37 – Dispositivo de Absorção Universal (USD) (Zollinger, 2005)

Os agregados são armazenados numa câmara fechada e sujeita à vácuo. Logo, após é introduzido o vapor até que uma pressão pré-determinada seja atingida. Com o auxílio de uma balança magnética de alta sensibilidade, a quantidade de vapor adsorvida na superfície dos agregados é determinada. Após a absorção estabelecer um equilíbrio, uma quantidade extra de vapor é adicionada até que o próximo valor pré-determinado de pressão de vapor seja alcançado. Repete-se esse procedimento dez vezes, obtendo-se uma isoterma referente a esses dez estágios relacionados ao aumento da pressão de vapor e da massa de solvente. Esses dois parâmetros são utilizados para o cálculo da energia de superfície e da área de superfície específica do agregado que podem ser visualizadas através da Figura 2.38.

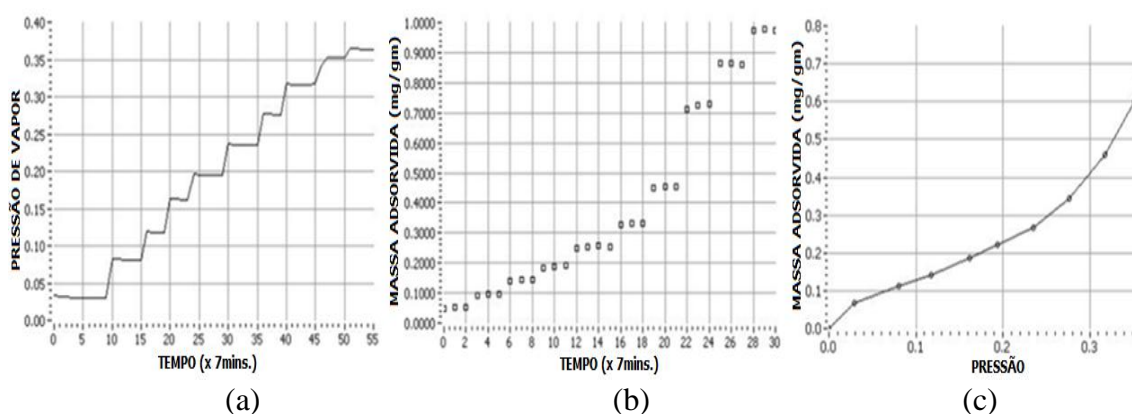


Figura 2.38 – Gráficos plotados através do uso do USD: (a) pressão de vapor *versus* tempo, (b) massa adsorvida de solvente *versus* tempo e (c) massa típica de solvente adsorvida *versus* isoterma de pressão de vapor (Zollinger, 2005).

### 2.11.3. Microcalorímetro

O microcalorímetro é um aparelho utilizado para medição da energia de superfície entre CAP e agregados através de: reação química, mudança de estado e formação de solução.

Durante a imersão de um sólido em um líquido, uma nova interface sólido-líquido é formada. Essa nova interface é associada com a mudança de energia do sistema sendo designada de entalpia de imersão que representa a força de interação na interface sólido-líquido. O microcalorímetro mede a adesão entre CAP e agregados através da entalpia de imersão dos agregados quando em contato com soluções de CAP. Entretanto, quando agregados quimicamente ativos, tais como calcário, ou DOPES entram em contato com o CAP, haverá interação química que poderá colaborar para melhorar a adesão (Bhasin, 2006; Vasconcelos *et al.*, 2008). Bhasin (2006) comprovou a eficácia do uso do microcalorímetro ao medir a energia de superfície para agregados em três líquidos de teste e determinar a energia relacionada à adesão entre CAP e agregado à Temperatura de Usinagem e Compactação (TUC) (aproximadamente 150°C).

O CAP é utilizado diluído em tolueno (1,5g de CAP em 11,0mL de tolueno) à temperatura ambiente e as soluções são armazenadas em quatro seringas de 2mL de capacidade. As soluções são deixadas em repouso por um período entre 12 e 24h. Vasconcelos *et al.* (2008) ressaltam vantagens com relação a utilização de soluções ao invés do CAP puro, tais como: possibilidade de realização do ensaio à temperatura ambiente, diminuição da variabilidade dos resultados, rapidez de execução do ensaio e aumento da vida útil do microcalorímetro.

Bhasin (2006) e Vasconcelos *et al.* (2008) utilizaram cerca de 8g de agregados passantes na peneira n°100 e retidos na peneira n°200 lavados em seguida em água corrente. Vasconcelos *et al.* (2008) ressaltam a importância dos agregados serem removidos por peneiramento e durante lavagens tendo em vista que as diferenças entre as áreas superficiais proporcionarão erros nas medidas obtidas com o microcalorímetro.

São utilizados dois frascos para armazenamento dos agregados, coloca-se  $8g \pm 0,01g$  em um frasco enquanto o outro permanecerá vazio servindo como referência. Os frascos devem possuir uma tampa de propileno vazada provida de tampão de silicone de maneira a impedir a passagem de ar, e a permitir a introdução da agulha da seringa de maneira a introduzir a solução durante o ensaio. Bhasin (2006) e Vasconcelos *et al.* (2008) afirmaram que, antes do início do ensaio, estes frascos de vidro devem ser previamente aquecidos a 150°C por um período de três horas e submetidos a uma pressão à vácuo abaixo de 300millitorr. Após o condicionamento, os dois frascos de vidro são esfriados naturalmente de modo a atingirem a temperatura ambiente. Após o

resfriamento, a solução de CAP é injetada nos frascos. A Figura 2.39 mostra o resumo dos principais passos descritos acima.

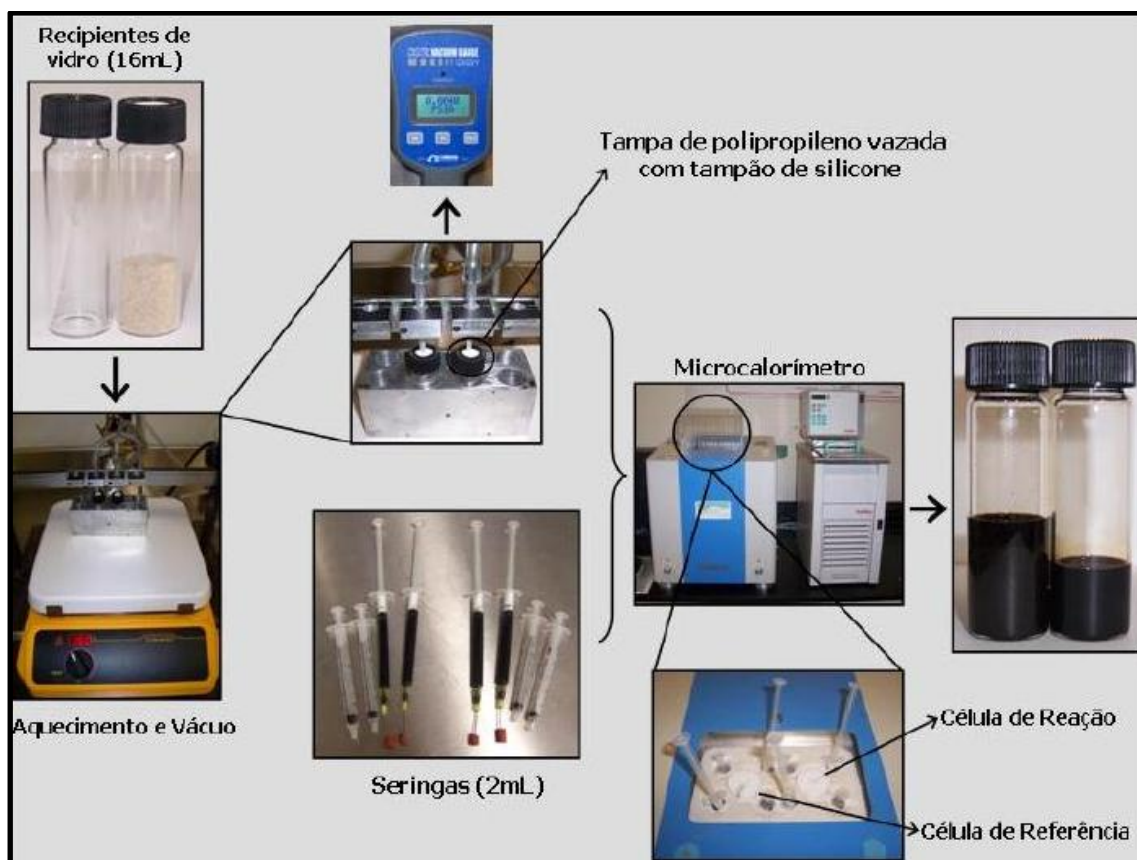


Figura 2.39 – Representação esquemática do procedimento experimental em um microcalorímetro (Vasconcelos *et al.*, 2008)

## 2.12. Modelagem de Dano por Umidade

O efeito deletério da água provoca deteriorações no pavimento mesmo sem a ação de carga mecânica. A presença da umidade faz com que aconteçam mudanças físicas nas propriedades dos materiais, seja no desenvolvimento inicial do dano, ou ocorrendo numa fase posterior da vida útil do pavimento. Uma parte dos problemas está associada ao efeito nas misturas asfálticas. Portanto, a evolução dos problemas ocasionados pelo efeito deletério da água em misturas asfálticas e a fraca correlação com os resultados de ensaios mecânicos convencionais, vêm motivando pesquisadores a fazerem investigações experimentais e analíticas sobre dano por umidade nas últimas duas décadas.



Entretanto, ainda existem muitas lacunas importantes relacionadas com o desenvolvimento de modelos e a determinação de parâmetros para os mesmos. O objetivo desses modelos é a previsão da influência das propriedades de diversos materiais e projeto de mistura com relação ao dano por umidade em misturas asfálticas. A modelagem baseada na teoria da mecânica do contínuo e da fratura têm sido utilizadas com objetivo de interpretar diversos processos de deterioração física e mecânica relacionados a esse fenômeno (Zollinger, 2005; Arambula, 2007).

Lottman e Bregec (1990) utilizaram o *software* ACMODAS (*Asphalt Concrete Moisture Damage Analysis System*) para prever as mudanças ocasionadas pela água no desempenho de vários tipos de misturas asfálticas (com a utilização de DOPES, polímeros e a combinação entre ambos, compactadas pelos métodos Marshall e Superpave).

Em 2003, foi criado na Holanda, mais precisamente no grupo de mecânica dos sistemas estruturais da Universidade de Tecnologia de Delft, o programa RAVEMOD. O principal objetivo deste programa é o desenvolvimento de uma abordagem com maior fundamentação para a identificação e a quantificação dos processos de dano por umidade induzida e suas fundamentações mecânicas (Kringos e Scarpas, 2008). Estes autores desenvolveram um modelo utilizando o Método dos Elementos Finitos (MEF) baseado na mecânica do contínuo, no qual diversos mecanismos de deterioração mecânica e física relacionados ao efeito deletério da água em misturas asfálticas foram considerados. Alguns fatores como o amolecimento da matriz viscoelástica do CAP ou o amolecimento da mistura asfáltica, devido à difusão da umidade, foram considerados responsáveis por esses mecanismos.

Zollinger (2005) avaliou a suscetibilidade à umidade de agregados e do CAP através da compreensão de micromecanismos que influenciam a ligação adesiva entre CAP/agregados e a força coesiva do CAP. Arambula (2007) analisou a relação entre o  $V_v$  e a suscetibilidade à umidade através de um modelo baseado na mecânica da fratura e na energia dissipada de materiais viscoelásticos. Caro *et al.* (2008b) desenvolveram um novo método de avaliação de dano por umidade induzida para misturas asfálticas baseado na aplicação de modelos probabilísticos e princípios da mecânica da fratura.

Caro *et al.* (2010) utilizaram um modelo acoplado micromecânico de dano por umidade em misturas asfálticas com o intuito de desenvolver um estudo paramétrico no efeito das propriedades do material com relação ao dano por umidade. O modelo utilizado por estes autores foi acoplado e, sequencialmente, implementado utilizando o MEF através do *software* Abaqus 24. Diferentes combinações foram analisadas, dentre elas: (i) dois tipos de agregados, (ii) três tipos de Matriz de Agregados Finos (MAFs), (iii) duas diferentes interações (física e mecânica) entre as propriedades da interface MAF/agregados e (iv) dois diferentes tipos de coeficientes de difusão de umidade. Foram aplicadas cinco diferentes velocidades de carregamento (1,00mm/s; 0,075mm/s; 0,05mm/s, 0,035mm/s e 0,025mm/s) e o mesmo gradiente de umidade. Estes autores verificaram que os resultados oriundos das simulações indicam que as propriedades físicas dos materiais tal como o coeficiente de difusão de umidade influenciaram de forma relevante o aumento do dano.

O desenvolvimento de ferramentas computacionais vem proporcionando uma análise mecânica do dano por umidade em misturas asfálticas. A compreensão desse fenômeno irá ajudar numa melhor seleção de materiais a serem empregados e assim minimizar o efeito deletério da água em misturas asfálticas.

## CAPÍTULO 3

### MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são abordados as especificações e os ensaios de caracterização dos seguintes materiais usados nesta pesquisa: CAP, LCC, cal, agregados e misturas asfálticas. Da mesma maneira, são descritos os procedimentos utilizados para a dosagem das misturas asfálticas e moldagem dos Corpos de Prova (CPs), além das curvas granulométricas selecionadas partindo da granulometria dos agregados utilizados. Vale ressaltar que os ensaios utilizados para a caracterização das misturas asfálticas foram realizados com amostras não condicionadas e condicionadas, ou seja, submetidas a ciclos de congelamento e aquecimento. Foram compactados um total de 134 CPs e as quantidades destinadas a cada ensaio estão descritos na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Quantidade de CPs por ensaio deste estudo

Mistura	Vv (%)	Quantidade de CPs / Ensaio			
		Dosagem	Lottman	MR	Desgaste Cântabro
CAP Convencional	4	-	10	-	-
	7	8	10	10	10
	7*	-	10	-	-
CAP + 2% LCC	7	8	10	10	10
CAP + 2% Cal	7	8	10	10	10
Total/Ensaio		24	50	30	30
Total de CPs				134	

\* Mistura asfáltica submetida a ciclo de resfriamento de 10°C

### 3.1. Características dos Materiais deste Estudo

#### 3.1.1. Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP)

O CAP utilizado nesta pesquisa é caracterizado por penetração como CAP 50/70. Este é processado na Petrobras/Lubnor, a partir da destilação à vácuo de petróleo brasileiro proveniente do Campo Fazenda Alegre, no Espírito Santo. As características do CAP são apresentadas na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 – Características do CAP 50/70 cedidas pela Lubnor, conforme ensaios da especificação ANP realizados na própria refinaria

Característica	Método	Especificação	Resultado	Unidade
Penetração	D 5	50 a 70	59	0,1 mm
Ponto de Amolecimento	D 36	46 min	51,2	°C
Viscosidade Saybolt Furol a 135°C	E 102	141 min	226	s
Viscosidade Brookfield a 135°C SP21 20 RPM	D 4402	274 min	444	cp
Viscosidade Brookfield a 150°C SP21	D 4402	112 min	215	cp
Viscosidade Brookfield a 177°C SP21	D 4402	57 a 285	77	cp
RTFOT Penetração Retida	D 5	56 min	75	%
RTFOT – Aumento do Ponto de Amolecimento	D 36	8 max	4,8	°C
RTFOT – Dutibilidade 25°C	D 113	20 min	>150	cm
RTFOT Variação em Massa (%)	D 2872	0,5 max	0,050	%
Dutibilidade a 25°C	D 113	60 min	>150	cm
Solubilidade no Tricloroetileno	D 2042	99,5 min	100,0	% massa
Ponto de Fulgor	D 92	235 min	294	°C
Índice de Suscetibilidade Térmica	X 018	-1,5 a 0,7	-0,5	N/A
Aquecimento a 177°C	X 215	NESP <sup>(1)</sup>	NESP	N/A

Nota: (1) NESP = Não espuma

### 3.1.2. Líquido da Castanha de Caju (LCC)

O Líquido da Castanha de Caju (LCC) técnico foi fornecido em galão pela fábrica de castanha Iracema Ltda localizada em Fortaleza-CE, sendo extraído durante o processo de beneficiamento da castanha de caju (Figura 3.1). A Tabela 3.3 apresenta algumas propriedades físico-químicas do cardanol, principal constituinte do LCC técnico.



Figura 3.1 – LCC técnico proveniente da fábrica de castanha Iracema Ltda.

Tabela 3.3 – Propriedades físico-químicas do cardanol (Dantas, 2000)

Características	
Fórmula Estrutural	OHC <sub>6</sub> H <sub>4</sub> C <sub>15</sub> H <sub>27</sub>
Peso Molecular	300
Fórmula Empírica	C <sub>21</sub> H <sub>32</sub> O
Índice de Refração	N <sub>D</sub> <sup>25</sup> 1,5112
Ponto de Ebulição (10mmHg)	225°
Ponto de Fusão (menor que)	50°
Densidade	0,9272-0,9350
Volatilidade	3%
Índice de Iodo (Método Catalítico)	Mín. 301
Índice de Acidez	Máx. 5
Índice de Basicidade	180-190
Cor (Recentemente Destilado)	Castanho-Claro

### 3.1.3. Cal Hidratada

A cal hidratada tipo CH-I foi utilizada como filler artificial em uma das misturas asfálticas compostas por CAP convencional e teor de 2% de cal. A quantidade de cal adicionada equivale à substituição de 2% da porcentagem passante na peneira N° 200, enquadrada na faixa C do DNIT (DNIT-ES 031/2006). A cal foi fornecida pela fábrica Carbomil S/A, situada na Fazenda Grande localizada a aproximadamente 20km da cidade de Limoeiro do Norte-CE. A Tabela 3.4 mostra a composição química da cal, fornecida pelo fabricante.

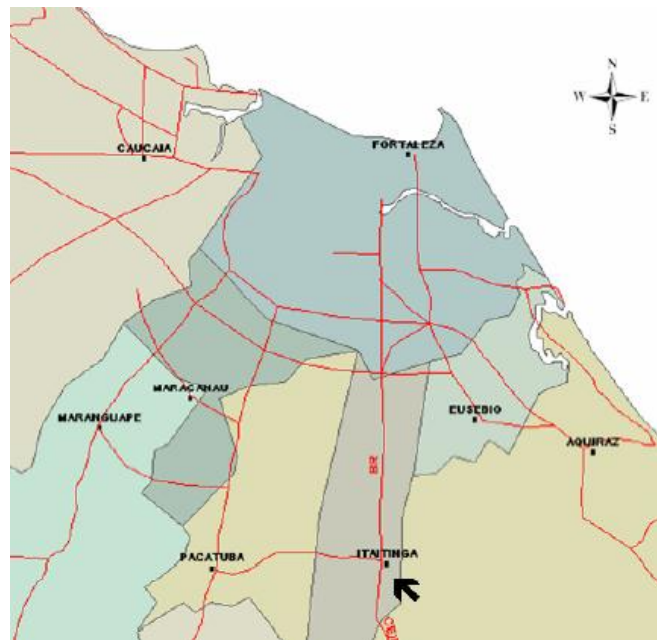
Tabela 3.4 – Composição química da cal hidratada (Fonte: Carbomil S/A)

Composto	Quantidade (%)
Perda por Calcinação	23,0 - 25,0
Ca(OH) <sub>2</sub>	92,5 - 98,5
MgO	3,5 máx
Resíduo Insolúvel em HCl	0,5 máx
SiO <sub>2</sub>	0,3 máx
R <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,5 máx

### 3.1.4. Agregados

Neste trabalho foram utilizados agregados de natureza granítica provenientes da pedreira Itaitinga (MFT), localizada a aproximadamente 30km da cidade de Fortaleza-

CE (Figura 3.2). A porcentagem de utilização dos agregados foi escolhida de modo a enquadrar as misturas de agregados na Faixa C do DNIT. Foram utilizadas as britas 3/4” e 3/8” como agregado gráudo e como agregado miúdo um pó de pedra da mesma pedreira. Nesta pesquisa, além do pó de pedra, também foi utilizado a cal hidratada como fíler artificial, a depender do tipo de mistura que se estava adotando.



(a)



(b)



(c)

Figura 3.2 – (a) Localização da pedreira Itaitinga (MFT), (b) Vista da pedreira e (c) Coleta de agregados

### 3.2.1. Modificação do CAP

A modificação do CAP foi feita no Laboratório de Mecânica dos Pavimentos (LMP) da Universidade Federal do Ceará (UFC) com a utilização dos seguintes misturadores: (a)

IKA® modelo RW20 e (b) Silverson® L4R (Figura 3.3), ambos equipados com agitador mecânico e controlador de temperatura. O misturador IKA® foi utilizado no preparo de amostras de 200g de CAP modificado para realização de ensaios de caracterização do próprio CAP. O misturador Silverson® foi utilizado no preparo de 2kg de CAP modificado para a utilização na dosagem e moldagem de CPs para a caracterização das misturas asfálticas. Tomando como base os resultados de viscosidade, o CAP foi modificado com 2% de LCC na seguinte condição: a temperatura de  $160\pm 5^{\circ}\text{C}$  e a rotação de 1000rpm durante 1 hora. O LCC foi adicionado lentamente após a estabilização da temperatura.



Figura 3.3 – Misturadores: (a) IKA® RW20 e (b) Silverson® L4R utilizados neste estudo

### 3.3. Ensaios para Caracterização do CAP

#### 3.3.1. Infravermelho (IV)

A análise da composição química do CAP convencional e do CAP modificado com LCC foi feita através de espectroscopia na região do infravermelho por transformada de *Fourier* (FTIR - em inglês *Fourier Transform Infrared*). Os espectros das amostras de CAP convencional e CAP modificado com 2% de LCC foram realizados no espectrômetro da Shimadzu® modelo FTIR – 8300 (Figura 3.4), na faixa de  $400$  a  $4000\text{cm}^{-1}$ , no módulo da reflectância total atenuada (ATR - em inglês *Attenuated Total Reflectance*).



Figura 3.4 – Espectrômetro FTIR Shimadzu® modelo FTIR – 8300 usado neste estudo

### **3.3.2. Análise Termogravimétrica (TGA)**

As curvas termogravimétricas das amostras de CAP convencional e modificado com LCC foram obtidas através do sistema Shimadzu® TGA-50 (Figura 3.5). Os experimentos foram realizados em atmosfera oxidativa (ar) e em atmosfera inerte (argônio) com fluxo de 50mL/min. Foram utilizadas 10mg das amostras aquecidas à razão de 10°C/min, na faixa de temperatura de 25 a 650°C.



Figura 3.5 – Sistema Shimadzu® TGA-50 utilizado neste estudo

### **3.3.3. Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC)**

As amostras de CAP convencional e modificado com LCC foram analisadas em um sistema Shimadzu® DSC-50 com fluxo de nitrogênio de 50mL/min (Figura 3.6). Utilizou-se aproximadamente 10mg dessas amostras pesadas em uma balança Mettler®. As amostras foram esfriadas até -90°C e depois aquecidas. Ao atingir a temperatura ambiente, as amostras foram aquecidas até 500°C a uma razão de 5°C/min.





Figura 3.6 – Sistema Shimadzu® DSC-50 utilizado neste estudo

#### ***3.3.4. Estudo do Envelhecimento Oxidativo em Estufa de Filme Fino Rotativo***

O ensaio em estufa de filme fino rotativo (*Rolling Thin Film Oven Test - RTFOT*) foi realizado conforme procedimento descrito pela ASTM D2872 (2004) (Figura 3.7). Através deste ensaio, busca-se simular mudanças nas propriedades do CAP que podem acontecer durante a usinagem. Este ensaio também pode ser utilizado para a determinação da variação de massa indicando, desta maneira, a volatilidade do CAP.



Figura 3.7 – Estufa RTFOT utilizada neste estudo

Para a realização deste ensaio, são utilizados recipientes de vidro que são pesados com aproximadamente 35g de amostra. As amostras são aquecidas a 163°C por um período de 85 minutos em atmosfera oxidativa. Em seguida, as amostras são resfriadas à temperatura ambiente e depois pesadas para a determinação da perda de massa.

#### ***3.3.5. Determinação da Viscosidade***

A viscosidade absoluta do CAP convencional e modificado com LCC antes e após RTFOT foi determinada de acordo com o procedimento descrito pela ASTM D

4402. As viscosidades foram analisadas nas seguintes temperaturas: 135°, 150° e 175°C através do viscosímetro Brookfield® modelo DVII<sup>+</sup> conectado a um controlador de temperatura Thermosel® (Figura 3.8). A função deste controlador é medir a viscosidade indiretamente através do torque necessário para girar uma haste de prova metálica (*spindle*) imersa numa cubeta contendo CAP aquecido. Foi utilizada uma rotação de 20rpm e *spindle* de geometria 21 para as amostras de CAP convencional e CAP + 2% LCC. Os dados de viscosidade adquiridos foram utilizados para o cálculo das Temperaturas de Usinagem e Compactação (TUC) conforme o método ASTM D2493 (2001). Realizando-se a viscosidade a 135°C, antes e após o envelhecimento simulado via RTFOT, determinou-se o Índice de Envelhecimento (IE) que é demonstrado em função de uma relação entre as viscosidades do CAP convencional e modificado com LCC antes e após o envelhecimento via RTFOT.



Figura 3.8 – Viscosímetro Brookfield® modelo DVII<sup>+</sup> utilizado neste estudo

### **3.3.6. Ensaios em Reômetro de Cisalhamento Dinâmico (DSR)**

Estes ensaios foram realizados em reômetro de cisalhamento dinâmico modelo AR 2000® fabricado pela TA Instruments (Figura 3.9). As amostras de CAP convencional e CAP modificado com LCC foram preparadas em moldes de silicone com 1mm e 2mm de espessura e 25mm e 8mm de diâmetro, respectivamente. Estes ensaios foram realizados com a utilização da geometria de placas paralelas.



Figura 3.9 – Reômetro de Cisalhamento Dinâmico (DSR) TA® AR 2000 utilizado neste estudo

Verificou-se o comportamento da relação entre o módulo dinâmico e o ângulo de fase em função da temperatura (ASTM D6373, 1999 e AASHTO TP5, 2004). Analisou-se o efeito da temperatura com relação aos seguintes parâmetros:  $G^*$ ,  $G'$ ,  $G''$ ,  $\delta$  e  $\tan \delta$  de 0,01 a 10Hz, a altas temperaturas (10 a 65°C) e a baixas temperaturas (40 a -10°C). Os ensaios realizados a baixas temperaturas foram feitos acoplado-se ao reômetro um DEWAR modelo PV-60® contendo nitrogênio líquido. A partir dos resultados obtidos, construiu-se curvas mestras representadas horizontalmente em escala log-log, utilizando a temperatura de 25°C como temperatura de referência.

### **3.3.7. Ensaios em Reômetro de Fluência em Viga (BBR)**

Utilizou-se o reômetro de fluência em viga (BBR – *Bending Beam Rheometer*, em inglês) do fabricante CANON® *Instruments*, para a caracterização do CAP a baixas temperaturas (Figura 3.10). Através deste ensaio, determinou-se o módulo de rigidez estático ( $S$ ) e o logaritmo do módulo de relaxação ( $m$ ), conforme o procedimento da ASTM D 6648. Esses parâmetros foram determinados a partir da resposta ao carregamento estático (*creep*) sobre uma vigota de CAP a baixas temperaturas.



Figura 3.10 – Reômetro de Fluência em Viga (BBR) CANON® utilizado neste estudo

### 3.4. Agregados

#### 3.4.1. Caracterização Química

Os agregados foram submetidos a uma caracterização química no Laboratório de Raio-X no Departamento de Física da UFC. Utilizou-se um espectrômetro de fluorescência de Raio-X, Rigaku® modelo ZSX Mini II com tubo de paládio (Figura 3.11). Realizou-se uma análise química semi-qualitativa (identificação dos elementos químicos presentes) e semi-quantitativa (identificação do teor de cada elemento). Para a realização desse ensaio foi necessário 1g da mistura de agregados passante na peneira N°200.



Figura 3.11 – Espectrômetro de fluorescência de Raio-X, do laboratório de Física da UFC, utilizado neste estudo

O espectrômetro de fluorescência de Raio-X é provido de uma fonte de radiação X ou radiação gama cuja energia elevada é capaz de provocar excitações nos átomos da amostra a ser analisada. A fonte de radiação emite fótons que são absorvidos pelos elétrons da amostra acarretando na mudança de uma camada eletrônica para outra

camada superior. O espectro energético correspondente a essa mudança é único para cada elemento permitindo assim a identificação de cada elemento. Vale salientar que são identificados apenas os elementos químicos situados entre o flúor e o urânio (Antunes *et al.*, 2010).

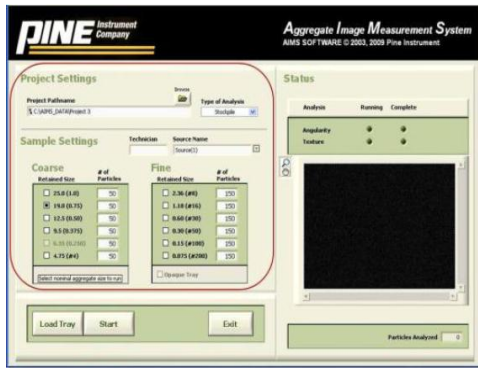
### **3.4.2. Caracterização dos Agregados com Relação à Angularidade, Esfericidade e Textura**

A caracterização dos agregados com relação à angularidade, esfericidade e textura foi efetuada a partir da utilização do equipamento de obtenção e processamento de imagens *Aggregate Imaging Measurement System (AIMS)*, PINE Instrument Company modelo AFA2A®. Utilizou-se o *software AIMS SOFTWARE* © 2003 para a aquisição e a análise dos resultados. O procedimento de caracterização do *AIMS* funciona para a análise de agregados graúdos (maiores do que 4,75mm) e de agregados miúdos (menores do que 4,75mm) (Tabela 3.5).

Tabela 3.5 – Série de peneiras adotadas pelo *AIMS*

<b>Peneira</b>	<b>Malha da peneira (mm)</b>	<b>Classificação quanto ao tamanho</b>
1/2"	12,5	Graúdo
3/8"	9,5	
4	4,75	
8	2,36	Miúdo
16	1,18	
30	0,60	
50	0,30	
100	0,15	
200	0,075	

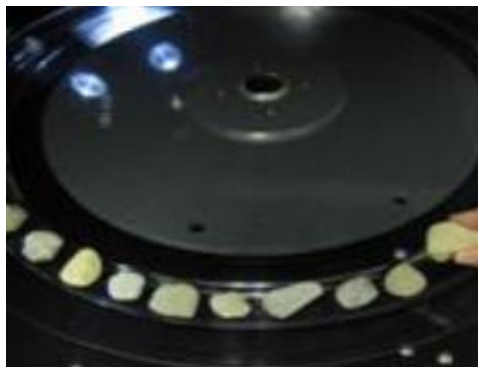
O *AIMS* utiliza um método direto para a análise de propriedades de agregados graúdos e miúdos tendo como base a aquisição e o processamento de imagens em diferentes resoluções. A Figura 3.12 mostra as etapas referentes ao processo de utilização do *AIMS*.



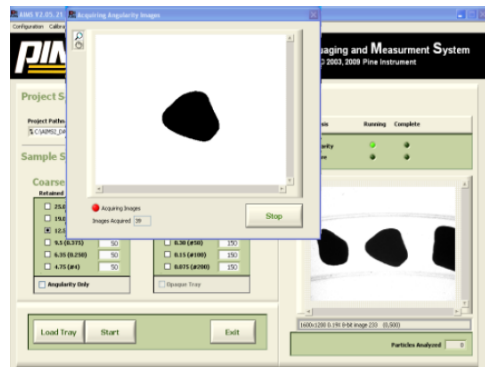
Configuração do *software*



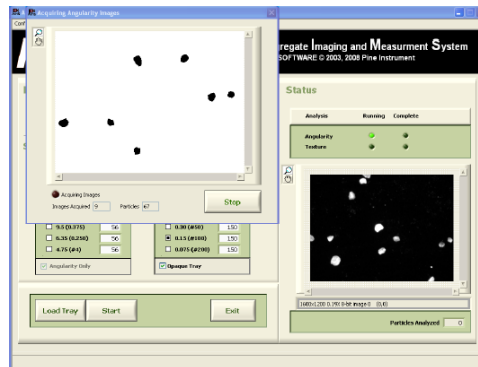
Equipamento pronto para o início do ensaio



Posicionamento das partículas de agregados



Captura de imagens: agregados graúdos



Captura de imagens: agregados miúdos

Figura 3.12 – Etapas de utilização do AIMS neste estudo (PINE, 2010)

### 3.5. Dosagem das Misturas Asfálticas

#### 3.5.1. Definição das Curvas Granulométricas

As misturas asfálticas utilizadas neste trabalho são do tipo Concreto Asfáltico (CA) com graduações densas e enquadradas na faixa C do DNIT (DNIT-ES 031/2006). A granulometria das misturas asfálticas analisadas é mostrada na Tabela 3.6. A Figura 3.13 mostra a distribuição granulométrica das seguintes misturas: (i) CAP convencional, (ii) CAP + 2% LCC e (iii) CAP convencional e 2% de cal como fíler. A mistura

contendo CAP convencional e a mistura com CAP modificado com LCC são constituídas das seguintes frações granulométricas: (i) 20% de brita 3/4", (ii) 36% de brita 3/8" e (iii) 44% de pó de pedra. A mistura contendo CAP convencional e 2% de cal como fíler apresenta a seguinte fração granulométrica: (i) 18% de brita 3/4", (ii) 47% de brita 3/8", (iii) 33% de pó de pedra e (iv) 2% de cal. Estão também inclusos na Figura 3.13, os limites da Faixa C do DNIT, os conceitos referentes à metodologia Superpave (*Superior Performing Asphalt Pavement*), pontos de controle e Zona de Restrição (ZR) para o Tamanho Máximo Nominal (TMN) de 19,1mm.

Tabela 3.6 – Granulometria dos agregados utilizados nas misturas

Peneira	Abertura (mm)	Passante (%)		
		3/4"	3/8"	Pó de pedra
3/4"	19,1	100,0	100,0	100,0
1/2"	12,5	42,5	100,0	100,0
3/8"	9,5	12,4	100,0	100,0
4	4,76	2,3	37,3	98,6
10	2,0	1,8	10,6	74,2
40	0,42	1,3	4,8	36,8
80	0,18	1,0	2,9	20,0
200	0,074	0,5	1,5	9,1

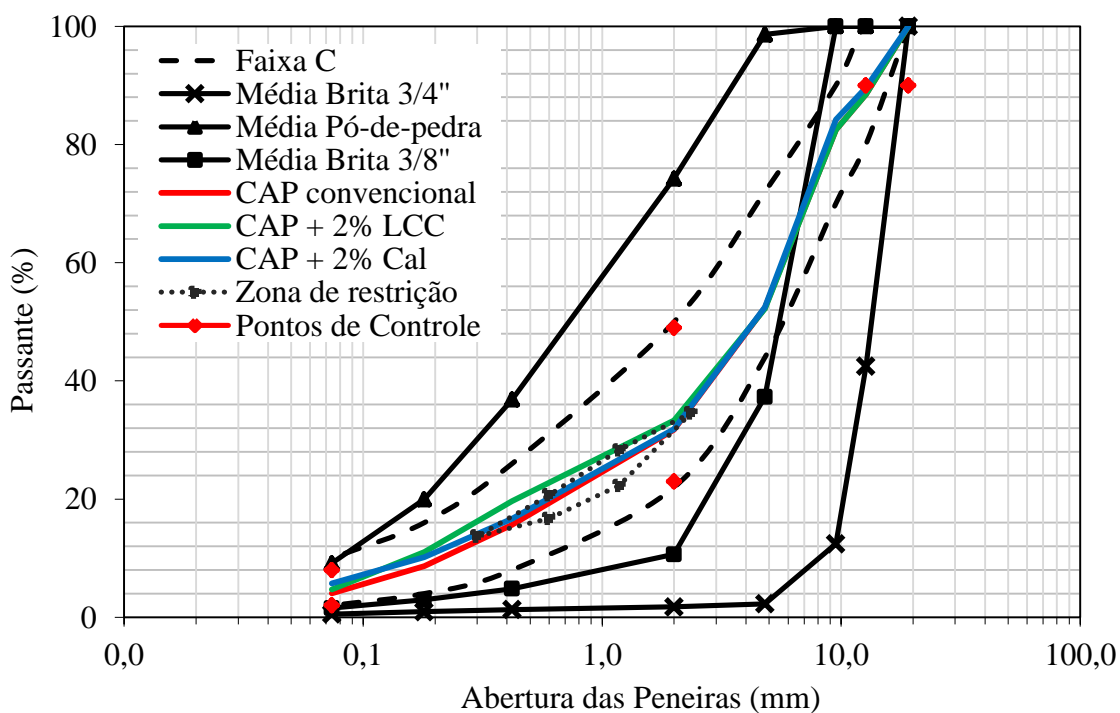


Figura 3.13 – Distribuição granulométrica dos agregados e das misturas asfálticas

Observa-se que as três misturas apresentaram granulometrias praticamente iguais e que a mistura contendo CAP convencional e a mistura com CAP modificado com 2% de LCC, passam por dentro da ZR. Estudos realizados por Frota *et al.* (2006) com três tipos de misturas: (i) acima, (ii) abaixo e (iii) passando dentro da ZR, verificaram comportamento semelhante para os três tipos de misturas, além de desempenho mecânico aceitável (fluência e estabilidade Marshall) para a mistura que passou dentro dessa zona.

Aragão *et al.* (2007) analisaram misturas com cinco granulometrias diferentes (duas com agregados de origem rochosa e três com agregados provenientes das margens de rios de Nebraska) passando acima, abaixo e através da ZR. Os estudos realizados por estes autores constataram que a ZR não deve ser utilizada como critério limitador de granulometrias. Misturas passando dentro da ZR apresentaram comportamento mecânico semelhante, relacionado à resistência a deformação permanente, ou até superior às outras misturas que não passaram pela ZR.

### **3.5.2. Confeção e Dosagem das Misturas Asfálticas**

Para a compactação dos CPs foi utilizado um Compactador Giratório Superpave (CGS) da marca Troxler® (Figura 3.14). Foram compactados CPs para três esforços de compactação (número de giros): (i)  $N_{inicial}$ , (ii)  $N_{projeto}$  e (iii)  $N_{máximo}$ . Para avaliar a compactabilidade da mistura são utilizados os esforços de compactação  $N_{inicial}$  e  $N_{máximo}$ . O  $N_{projeto}$  é utilizado para a seleção do teor de CAP de projeto. Estes valores são empregados em função do tráfego e variam de acordo com a norma de dosagem Superpave. Neste trabalho, considerou-se o tráfego como de médio a alto (vias principais e rodovias rurais), consistindo, portanto de:  $N_{inicial} = 8$  giros,  $N_{projeto} = 100$  giros e  $N_{máximo} = 160$  giros. Segue um breve resumo da norma Superpave para dosagem de misturas asfálticas (SHRP, 1994):

- Determinar as alturas referentes dos CPs para cada esforço de compactação ( $N_{inicial}$ ,  $N_{projeto}$  e  $N_{máximo}$ ) e, através das mesmas, estimar a massa específica da mistura asfáltica;
- Corrigir a massa específica estimada através de um fator de correção tendo em vista que o CP é um cilindro cujas laterais apresentam rugosidade. O fator de



correção é estabelecido como sendo a razão entre a massa específica aparente medida e a massa específica estimada no  $N_{\text{máximo}}$ :

- Determinar a massa específica aparente corrigida em relação à massa específica máxima medida para cada número de giros;
- Efetuar os cálculos referentes às propriedades volumétricas tendo como base as propriedades de projeto especificadas no método Superpave (Bernucci *et al.*, 2007).



Figura 3.14 – Compactador Giratório Superpave (CGS) utilizado neste estudo

A Figura 3.15 mostra os passos utilizados durante a fabricação e a compactação das amostras conforme a metodologia Superpave: (a) pesagem do CAP, (b) mistura de CAP e agregados, (c) envelhecimento a curto prazo por 2h em estufa na temperatura de compactação, (d) introdução da mistura asfáltica no molde cilíndrico, (e) adaptação do molde contendo a mistura no CGS e (f) extração do CP após compactação.



Adição de CAP aos agregados



Mistura entre CAP e agregados



Envelhecimento à curto prazo em estufa



Colocação da mistura no molde cilíndrico



Colocação da mistura no compactador CGS



Extração do CP após compactação

Figura 3.15 – Procedimento para compactação das amostras pelo método Superpave

### 3.6. Ensaios para Caracterização das Misturas Asfálticas

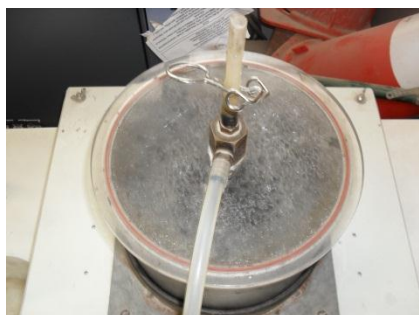
#### 3.6.1. Ensaio Lottman modificado

O ensaio de sensibilidade à ação deletéria da água foi realizado conforme procedimento descrito pela AASHTO T 283/99 que pode ser resumido conforme os passos descritos a seguir:

- Moldar CPs com Vv entre 6 e 8% no teor de CAP de projeto;

- Separar os CPs em dois grupos de no mínimo três CPs cada: condicionado e não condicionado;
- Realizar o ensaio de RT para os CPs referentes ao grupo não condicionado;
- Submeter os CPs do grupo condicionado a uma pressão de vácuo residual de 250-650mmHg no equipamento Rice de maneira a obter saturação entre 55 e 80% de água. O grau de saturação foi calculado dividindo-se o volume absorvido de água pelo  $V_v$  ( $\text{cm}^3$ );
- Cobrir os CPs com um filme plástico, inserir os mesmos em sacos plásticos vedados contendo 10mL de água destilada;
- Submeter os CPs a um ciclo de congelamento a  $-18^\circ\text{C}$  por um período de 16h;
- Submeter os CPs a um ciclo de aquecimento em banho maria a  $60^\circ\text{C}$  por um período de  $24 \pm 1$ h, após a retirada do filme e do saco plástico;
- Após o ciclo de aquecimento, retirar os CPs e imergir estes em outro banho a  $25^\circ\text{C}$  por um período de  $2 \pm 1$ h para estabilização da temperatura;
- Realizar o ensaio de RT para os CPs logo após todo o ciclo de condicionamento;
- Determinar a RRT cujo valor corresponde a razão entre o valor de RT para o grupo condicionado e aquele referente ao grupo não condicionado.

Este ensaio também foi realizado submetendo os CPs de uma das misturas (Superpave contendo CAP convencional) a um ciclo de congelamento com valor de temperatura diferente do procedimento descrito pela AASHTO T 283/99. Neste ciclo, os CPs foram mantidos por 16 horas a  $10^\circ\text{C}$ , sendo esta a única modificação comparado ao procedimento da AASHTO T 283/99. Furlan (2006) e Freitas (2010) afirmam que, o ciclo de congelamento à  $-18 \pm 2^\circ\text{C}$  possui pouca representatividade para pavimentos brasileiros tendo em vista que, a condição pavimento congelado, é limitada a poucas localidades e épocas do ano. A Figura 3.16 ilustra alguns passos utilizados durante todo o processo de condicionamento e ensaio dos CPs.



CPs submetidos à saturação à vácuo



Embalagem em sacos plásticos



Armazenamento em freezer



CPs após ciclo de congelamento



CPs submetidos a ciclo de aquecimento na estufa



CPs após 24h em estufa



CP submetido ao ensaio de RT



CP após ruptura

Figura 3.16 – Passos referentes ao ensaio de sensibilidade à ação deletéria da água conforme procedimento descrito na AASHTO T 283/99

### 3.6.2. *Desgaste Cântabro*

O procedimento utilizado para a realização desse ensaio foi descrito no item 2.10.6. Compactou-se dez CPs com  $V_v = 4\%$  pelo método de dosagem Superpave e dividiu-se os CPs em dois grupos de cinco CPs cada: (i) condicionado e (ii) não condicionado. Submeteu-se os CPs referentes ao grupo condicionado a ciclos de congelamento e de aquecimento de acordo com o procedimento descrito no item 3.4.3.

Inseriu-se um único CP de cada vez, de ambos os grupos, dentro do equipamento de abrasão *Los Angeles*, porém sem a utilização das esferas. Submeteu-se o CP a 300 revoluções a uma velocidade de 33rpm e à temperatura de 25°C. Após as 300 revoluções, retirou-se o CP pesando-o em seguida. Determinou-se o desgaste da mistura asfáltica conforme mostra a Equação 3.1:

$$D = \frac{M_1 - M_2}{M_1} \times 100 \quad (3.1)$$

Onde:

$D$  – Desgaste da mistura asfáltica em %;

$M_1$  – Massa do CP, antes do ensaio em g;

$M_2$  – Massa do CP, após o ensaio em g.

O método de ensaio DNER-ME 383 (1999) estabelece como limite de aceitação, um valor inferior a 25% de desgaste para misturas asfálticas drenantes. É importante salientar que este índice é indicado para misturas com elevada porcentagem de  $V_v$ .

### 3.6.3. *Módulo de Resiliência (MR)*

A realização desse ensaio teve como base os procedimentos descritos pelo DNIT-ME 135 (2010). O MR foi determinado em CPs compactados em laboratório (altura de  $6,35 \pm 0,13$ cm e diâmetro de  $10 \pm 0,02$ cm). Assumiu-se o valor de 0,30 para o coeficiente de Poisson ( $\mu$ ). A temperatura utilizada para estabilização dos CPs foi  $25^\circ\text{C} \pm 0,5^\circ\text{C}$  e os deslocamentos foram medidos através de dois LVDTs (Figura 3.17). Este ensaio é realizado apoiando-se o CP ao longo de suas geratrizes através de dois frisos de carga. Estes frisos são posicionados diametralmente, se comparado à direção da compressão,



acarretando numa tração atuando de maneira perpendicular ao longo do plano diametral levando o CP a ruptura ao longo dessa direção.

Foram compactados dez CPs para cada mistura,  $V_v = 4\%$  e método de dosagem Superpave, divididos em dois grupos: (i) condicionado e (ii) não condicionado. Submeteu-se os CPs do grupo condicionado a ciclos de congelamento e aquecimento conforme os procedimentos descritos no item 3.6.1.

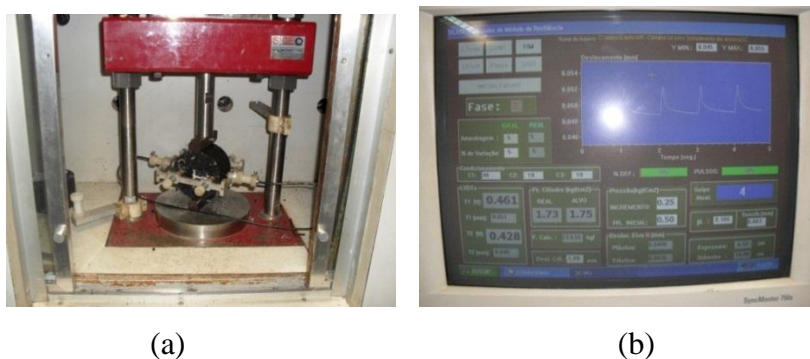


Figura 3.17 – (a) Equipamento utilizado para o ensaio de MR deste estudo, (b) Sistema de aquisição de dados

O procedimento para o ensaio de MR, de acordo com o método DNIT-ME 135 (2010), pode ser resumido da seguinte maneira:

- Posicionar o CP na base de apoio da estrutura de suporte do módulo de ensaio entre os dois frisos;
- Fixar e ajustar os LVDTs de maneira a obter o registro dos deslocamentos. Para esta pesquisa, os LVDTs foram ajustados entre 0,2 e 0,5V;
- Assentar o pistão de carga sobre o friso superior, fixar os parafusos nas hastes de suporte;
- Realizar uma fase de pré-condicionamento do CP aplicando-se 50 ciclos de ensaio. A frequência de aplicação dessa carga ( $F$ ) é de 60 ciclos/min com duração de 0,1 segundo e repouso de 0,9 segundo;
- Após a fase de pré-condicionamento dos CPs, sem interrupção aplicar cinco ciclos de ensaio adicionais cujo valor do MR é determinado pela média dos resultados adquiridos.

## CAPÍTULO 4

### RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são apresentados os resultados referentes à caracterização físico-química e aos ensaios reológicos com amostras de CAP convencional e CAP + 2% LCC e ensaios de caracterização de agregados. Através dos ensaios de viscosidade e da determinação da TUC, verificou-se que o teor de 2% de LCC adicionado ao CAP proporcionou maior redução destes parâmetros se comparado à amostra de CAP convencional. São também abordados o método de dosagem Superpave, apresentando os teores de CAP de projeto, nos quais foram moldados os CPs utilizados para a realização dos ensaios mecânicos. As misturas asfálticas foram por fim avaliadas através dos ensaios *Lottman* modificado, MR e desgaste Cântabro.

#### 4.1. Ensaios de Caracterização do CAP

##### 4.1.1. Análise Térmica

###### 4.1.1.1. Análise Termogravimétrica (TGA)

A Figura 4.1 mostra as curvas termogravimétricas das amostras de CAP convencional e CAP + 2% LCC em atmosfera oxidativa (O<sub>2</sub>) e atmosfera inerte (Argônio). Na Figura 4.1a (CAP convencional), verificam-se quatro eventos para a amostra de CAP convencional em atmosfera oxidativa. Constata-se que, até aproximadamente 210°C, o CAP permanece estável termicamente não tendo sido detectada qualquer perda de massa por volatilização seja em atmosfera oxidativa ou inerte. Em atmosfera oxidativa, os dois primeiros eventos (383°C e 422°C) estão relacionados à decomposição dos componentes referentes à fase maltênica do CAP, enquanto os dois últimos eventos (466°C e 551°C) são referentes à decomposição dos asfaltenos (Fernandes, 2007; Alencar, 2009). Na Figura 4.1b (CAP + 2% LCC), verifica-se que até 210°C não houve liberação de produtos voláteis. Entre 210°C e 340°C, verifica-se que a amostra de CAP + 2% LCC apresentou o mesmo comportamento térmico, tanto em atmosfera oxidativa quanto em atmosfera inerte, ou seja, a presença do LCC não desestabilizou termicamente o CAP.

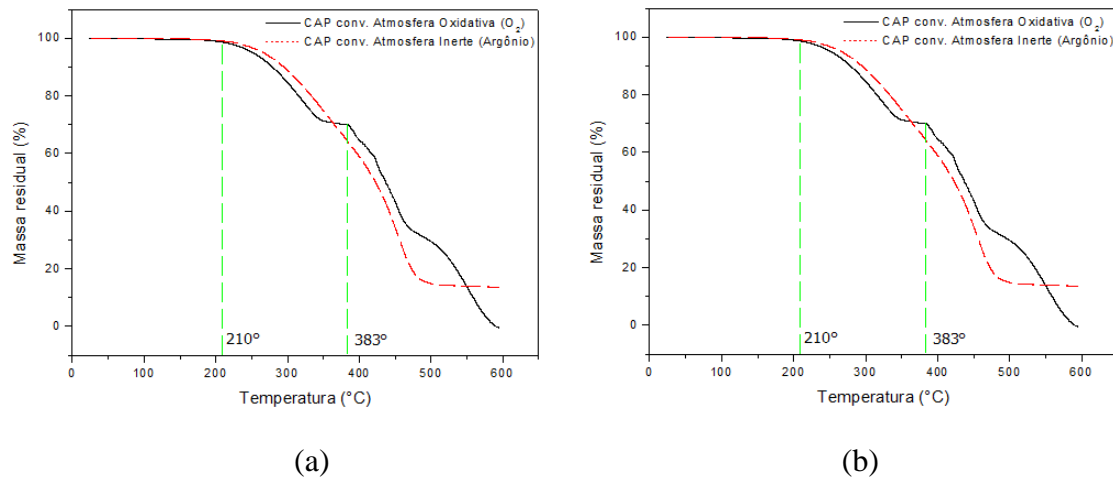


Figura 4.1 – Curvas termogravimétricas das amostras de: (a) CAP convencional e (b) CAP + 2% LCC em atmosfera oxidativa ( $O_2$ ) e atmosfera inerte (Argônio). Taxa de aquecimento:  $10^\circ C/min$ . Fluxo do gás:  $50 mL/min$ .

A semelhança fica mais clara na Figura 4.2 que mostra as curvas termogravimétricas da amostra de CAP convencional e modificado com LCC em atmosfera oxidativa e inerte. Constata-se que, tanto em atmosfera inerte ( $O_2$ ) quanto em atmosfera oxidativa (argônio), o processo de decomposição das amostras analisadas foram iniciadas aproximadamente em  $210^\circ C$ . A presença do oxigênio parece atuar mais em temperaturas elevadas para as amostras analisadas. A Tabela 4.1 mostra os valores das temperaturas de decomposição máxima ( $Td_{máx}$ ) obtidos a partir do cálculo da primeira derivada das curvas termogravimétricas para as amostras analisadas. Verifica-se que a presença do LCC em atmosfera oxidativa, ocasionou uma sutil estabilização quando são observadas as  $Td_{máx}$  dos eventos.

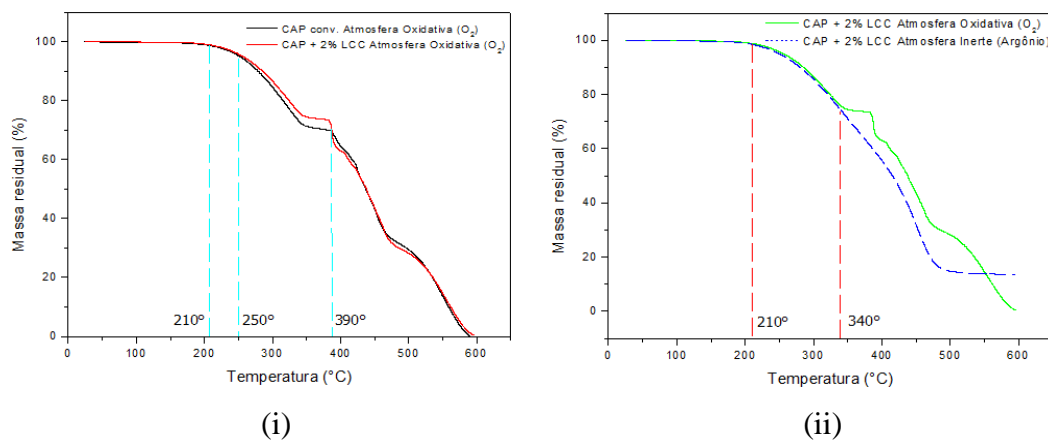


Figura 4.2 – Comparação entre curvas termogravimétricas das amostras de: (i) CAP convencional e (ii) CAP + 2% de LCC em atmosfera oxidativa ( $O_2$ ) e atmosfera inerte (Argônio). Taxa de aquecimento:  $10^\circ C/min$ . Fluxo do gás:  $50 mL/min$ .



Tabela 4.1 – Eventos referentes à decomposição das amostras de CAP em atmosfera oxidativa (O<sub>2</sub>) e atmosfera inerte (argônio)

Amostra	Td <sub>máx</sub> * (°C)						
	Atm. Oxidativa (O <sub>2</sub> )					Atm. Inerte (Argônio)	
	1°	2°	3°	4°	5°	1°	2°
CAP convencional	315	391	425	453	550	329	455
CAP + 2% LCC	323	387	438	463	554	320	454

\*Td<sub>máx</sub> refere-se à temperatura de decomposição máxima obtida pela 1ª derivada das curvas termogravimétricas para as amostras de CAP analisadas

#### 4.1.1.2. Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC)

O resultado do ensaio de DSC para as amostras de CAP convencional e CAP + 2% LCC é mostrado na Figura 4.3. A amostra de CAP convencional apresentou uma Transição Vítreia ( $T_g$ ) foi avaliada em -9°C condizente com o valor de  $T_g$  obtido por Bringel (2007). O valor de  $T_g$  (-9°C) é proveniente da região da interface entre asfaltenos e maltenos de composição misturada (provavelmente rica em resinas) e que por conveniência, pode ser chamada de interface apesar de não ser uma fase estritamente separada (Masson e Perc, 2005). A amostra de CAP + 2% LCC apresentou uma  $T_g$  avaliada em -14°C. O valor da  $T_g$  da amostra de CAP + 2% LCC é inferior se comparado à  $T_g$  da amostra de CAP convencional. Este fato pode ser considerado um indicativo de melhoria nas propriedades do CAP à baixas temperaturas tendo em vista que o CAP torna-se rígido e quebradiço em temperaturas abaixo ou igual ao valor da  $T_g$  (Harrisson *et al.*, 1992).

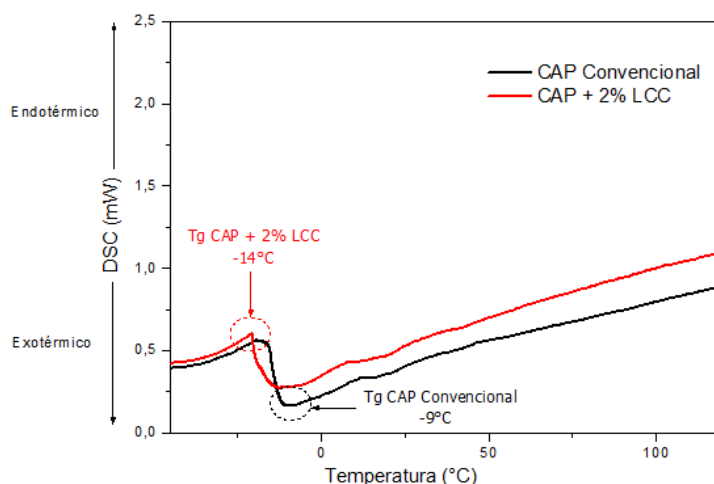


Figura 4.3 – Curva de DSC para as amostras de CAP convencional e CAP + 2% LCC.

Taxa de aquecimento: 10°C/min. Fluxo de Nitrogênio: 50mL/min.

## 4.1.2. Caracterização Estrutural

### 4.1.2.1. Espectroscopia Vibracional de Absorção no Infravermelho

A Figura 4.4 ilustra o espectro FTIR para o LCC técnico tendo sido observadas bandas em  $3344\text{cm}^{-1}$  referente a vibrações de estiramentos axiais de ligações OH e em  $1650\text{cm}^{-1}$  referente a vibrações de estiramento C=C e vibrações de C-H (Bringel, 2007; Alencar, 2009). As principais atribuições das outras bandas obtidas nos espectros FTIR, estão resumidas na Tabela 4.2.

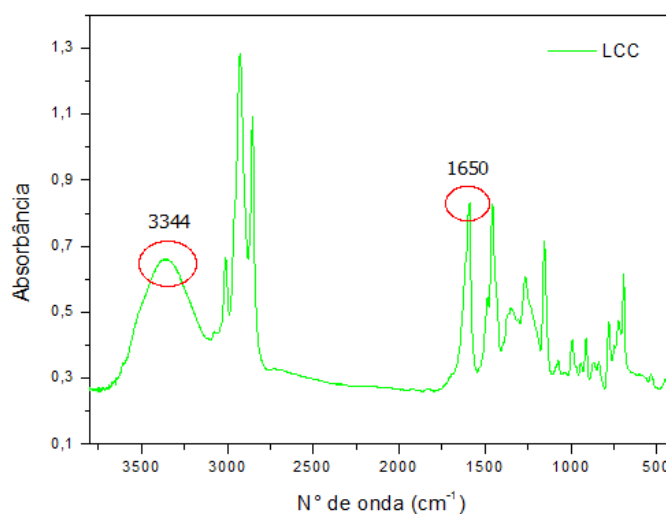


Figura 4.4 – Espectro na região do infravermelho para o LCC técnico deste estudo

Tabela 4.2 – Atribuições das bandas obtidas nos espectros FTIR do LCC deste estudo

Nº de onda ( $\text{cm}^{-1}$ )*	Nº de onda ( $\text{cm}^{-1}$ )	Atribuições
782	780	$\delta$ C – H do anel aromático
995	995	$\delta_{\text{ass}}$ CH <sub>2</sub> de olefina
1149	1149	$\nu$ C = O de fenol
1458	1455	$\delta_{\text{ass}}$ (CH <sub>2</sub> ), $\delta_{\text{ass}}$ (CH <sub>3</sub> ) da cadeia alquílica
1592	1585	$\nu$ C = C do anel aromático
1645	1650	$\nu$ C = C
2856	2800	$\nu_{\text{sim}}$ CH <sub>2</sub> alifático do grupo CH <sub>2</sub>
2925	2920	$\nu_{\text{ass}}$ CH <sub>2</sub> alifático do grupo CH <sub>2</sub>
3005	3005	$\nu$ C – H do anel aromático
3069	3075	$\nu$ C – H
3395	3344	$\nu$ O – H de fenol

\* (Bhunia *et al.*, 1999)

A Figura 4.5 ilustra o espectro FTIR para o CAP convencional e o CAP + 2% LCC. Os principais grupos funcionais analisados para a amostra de CAP + 2% LCC são

praticamente os mesmos se comparados aos encontrados para a amostra de CAP convencional. Não foram observadas maiores diferenças entre as amostras de CAP convencional e CAP + 2% LCC, tendo sido observadas algumas bandas em  $1710\text{cm}^{-1}$  e em  $3450\text{cm}^{-1}$  referentes a banda vibracional C=O e OH de grupos fenólicos ligados por pontes de hidrogênio, respectivamente (Rodrigues, 2006; França, 2007). As principais atribuições das outras bandas obtidas nos espectros FTIR, estão resumidas na Tabela 4.3.

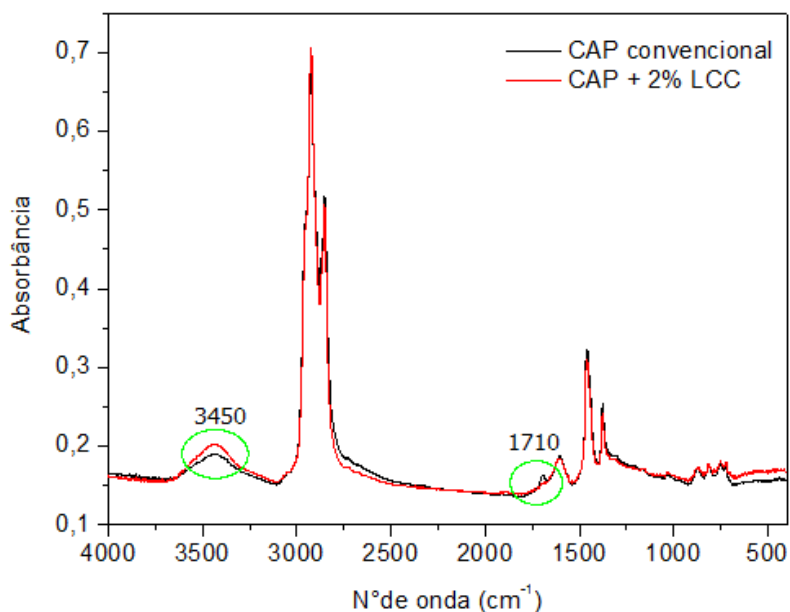


Figura 4.5 – Espectro na região do infravermelho para o CAP convencional e para o CAP + 2% LCC deste estudo

Tabela 4.3 – Atribuições das bandas obtidas nos espectros FTIR do CAP convencional e do CAP + 2% LCC deste estudo

Nº de onda ( $\text{cm}^{-1}$ )*	Nº de onda ( $\text{cm}^{-1}$ )	Atribuições
722	722	$\delta_r(\text{CH}_2)_n, n > 4$
746, 814 e 874	730, 820 e 880	$\delta\text{C} - \text{H}$ em aromáticos substituídos
1030	1032	$\nu \text{S} = \text{O}$
1310	1312	$\nu \text{SO}_2$
1376	1380	$\delta_{\text{sim}} \text{CH}_3$
1460	1480	$\delta_{\text{ass}} \text{CH}_2, \text{CH}_3$
1600	1600	$\nu \text{C} = \text{C}$
1700	1710	$\nu \text{C} = \text{O}$
2860	2870	$\nu \text{C} - \text{H} (\text{CH}_2)$
2920	2900	$\nu \text{C} - \text{H} (\text{CH}_3)$
3450	3450	$\nu \text{O} - \text{H}$

\* (Lamontagne *et al.*, 2001; Masson *et al.*, 2001; Ouyang *et al.*, 2006)

### 4.1.3. Ensaios Reológicos

#### 4.1.3.1. Determinação da Viscosidade

A Figura 4.6 mostra os resultados de viscosidade obtidos com a utilização do viscosímetro Brookfield® referentes ao CAP convencional e ao CAP modificado com LCC nos seguintes teores: 0,5%, 1,0%, 1,5% e 2,0%. Para a realização deste ensaio, foram utilizadas as seguintes temperaturas: 135°C, 150°C e 175°C. Estes resultados ilustram uma diminuição acentuada da viscosidade do CAP modificado com LCC se comparado ao CAP convencional principalmente para o teor de 2% LCC. Conforme comentado por Alencar (2009), as propriedades surfactantes do LCC possivelmente ocasionaram um rearranjo das moléculas diminuindo a sua resistência à fluidez. Essa diminuição na viscosidade pode acarretar menores gastos de energia nos procedimentos no qual o CAP modificado for utilizado.

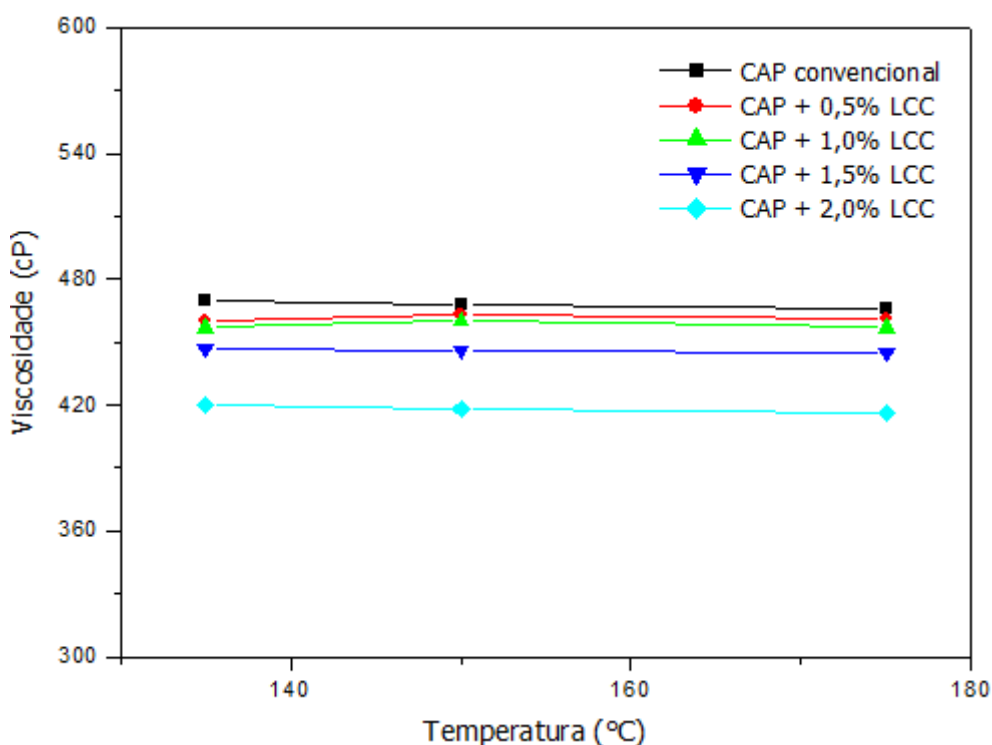


Figura 4.6 – Viscosidade em função da temperatura para CAP convencional e CAP modificado com diferentes percentuais de LCC deste estudo

Calculou-se, para as amostras analisadas, o Índice de Envelhecimento (IE) que consiste na relação entre as viscosidades do CAP antes e após o envelhecimento via RTFOT. O IE da amostra de CAP convencional e da amostra de CAP + 2% LCC é mostrado na Tabela 4.4 em termos de viscosidade a 135°C.

Tabela 4.4 – Mudanças na viscosidade após envelhecimento RTFOT para o CAP convencional e CAP + 2% LCC

Amostra	Viscosidade a 135°C (cP)		Índice de Envelhecimento
	Antes RTFOT	Após RTFOT	Após RTFOT/Antes RTFOT
CAP convencional	468	896	1,9
CAP + 2% LCC	418	747	1,8

Conforme os resultados mostrados na Tabela 4.4, constata-se que, para as amostras analisadas, houve aumento da viscosidade após o envelhecimento via RTFOT. A amostra de CAP + 2% LCC apresentou sutil redução dos valores obtidos para o IE se comparada à amostra de CAP convencional.

#### 4.1.3.2. Determinação das Temperaturas de Usinagem e Compactação (TUC) pelo Método Tradicional e pelo Método Casola

Os gráficos obtidos para a determinação das TUC para as amostras ensaiadas estão ilustradas nas Figuras de 4.7 a 4.11. Vale ressaltar que, os mesmos foram obtidos através da utilização do viscosímetro Brookfield® nas seguintes temperaturas: 135°C, 150°C e 175°C. Para as amostras de CAP convencional e para o CAP + 2% LCC, as faixas de viscosidade para a determinação da Temperatura de Compactação (TC) foi de 1,5 a 1,9 Poise e para a Temperatura de Usinagem (TU) foi de 2,5 a 3,1 Poise (ASTM D2493, 2001).

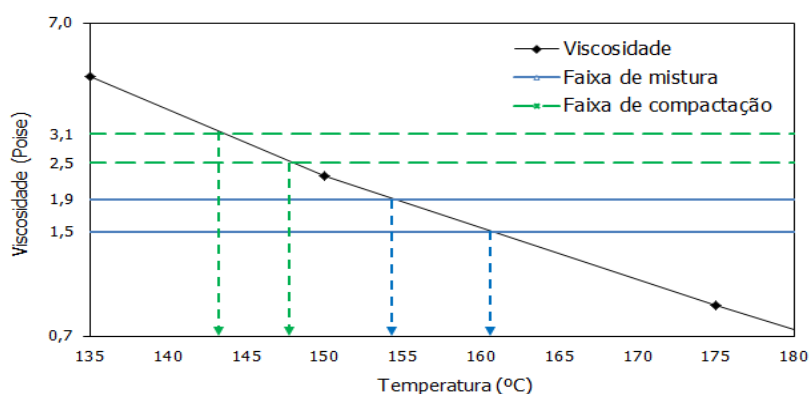


Figura 4.7 – Determinação da TUC para amostra de CAP convencional

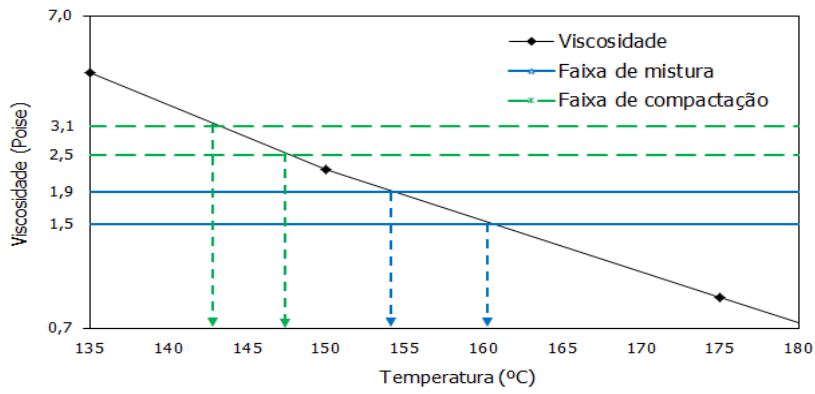


Figura 4.8 – Determinação da TUC para a amostra de CAP + 0,5% LCC

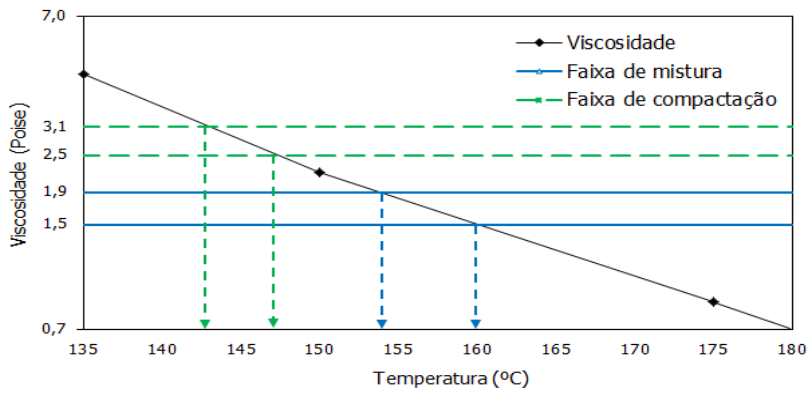


Figura 4.9 – Determinação da TUC para a amostra de CAP + 1,0% LCC

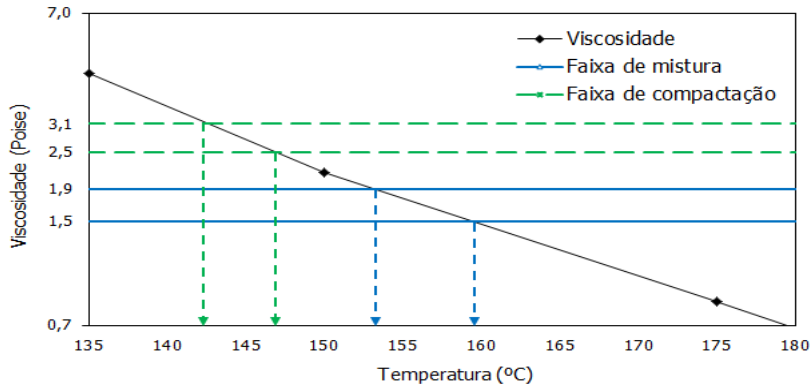


Figura 4.10 – Determinação da TUC para a amostra de CAP + 1,5% LCC

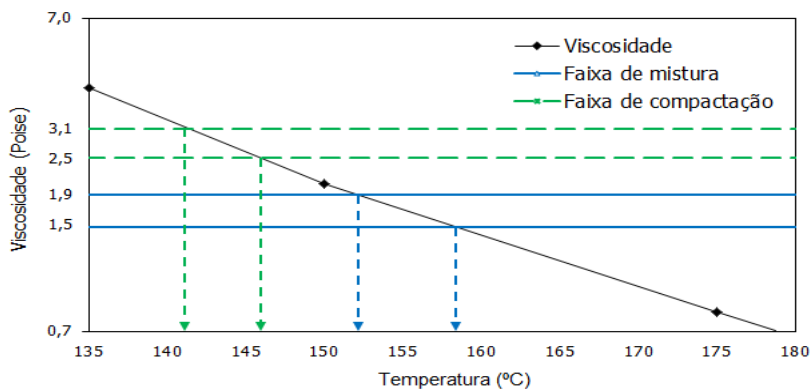


Figura 4.11 – Determinação da TUC para a amostra de CAP + 2,0% LCC

Os cálculos referentes a TUC foram efetuados através do viscosímetro rotacional e do método Casola utilizando o DSR (West *et al.*, 2010). No procedimento utilizando o viscosímetro rotacional, as TUC são referentes aquelas onde o CAP atinge uma determinada faixa de viscosidade. Estes dados foram correlacionados com a TUC da mistura através da Curva Logarítmica de Viscosidade *versus* Temperatura (CLVT) (ASTM D2493, 2001). Os resultados referentes às TUCs efetuados através da viscosidade pelo método CLVT, são mostrados na Tabela 4.5.

Tabela 4.5 – Valores das TUCs para os diferentes CAPs deste estudo através da CLVT

Ligante	Método CLVT	
	Temp. Usinagem (°C)	Temp. Compactação (°C)
CAP convencional	154 – 161	143 – 147
CAP + 0,5% LCC	154 – 161	143 – 147
CAP + 1,0% LCC	154 – 160	143 – 147
CAP + 1,5% LCC	153 – 159	142 – 147
CAP + 2,0% LCC	152 – 158	141 – 146

Segundo o método Casola, as TUCs foram determinadas pela varredura de frequência de 0,1 a 100 rad/s, a uma faixa de temperatura (40 a 100°C). Os resultados obtidos são mostrados na Tabela 4.6. Efetuou-se o cálculo da TUC conforme as Equações 4.1 e 4.2, nas quais  $w$  corresponde ao ângulo de fase referente à temperatura de 86°C.

$$\text{Temperatura de Usinagem (°F)} = 325 \times w^{-0,0135} \quad (4.1)$$

$$\text{Temperatura de Compactação (°F)} = 300 \times w^{-0,012} \quad (4.2)$$

Tabela 4.6 – Valores das TUCs para os diferentes CAPs, obtidos conforme o método Casola

Ligante	Método Casola	
	Temp. Usinagem (°C)	Temp. Compactação (°C)
CAP convencional	154	142
CAP + 2,0% LCC	152	140

Conforme os resultados exibido na Tabela 4.5, se comparado aos outros teores de LCC, os valores de TUC para o CAP + 2,0% LCC foram os mais baixos. Na Tabela 4.6, constatou-se que a amostra de CAP + 2% LCC proporcionou uma menor redução se comparada à amostra de CAP convencional. Por tal motivo não efetuou-se a obtenção da TUC segundo o método Casola para os outros teores de CAP modificado com LCC

(0,5 a 1,5% de LCC). Essa redução pode representar uma vantagem da utilização do LCC como aditivo do ponto de vista econômico e ambiental. Esses dados mostram que a adição do LCC à mistura asfáltica pode vir a reduzir gastos com energia durante a usinagem, a emissão de voláteis na atmosfera e a oxidação excessiva do CAP. Lima *et al.* (2009) também verificaram o bom desempenho do LCC com relação à diminuição da TUC em relação ao CAP convencional, ao constatarem uma redução média de 8°C para amostras de CAP + 4,5% SBS + 1% LCC se comparado ao CAP convencional.

O controle tecnológico dos materiais empregados na construção dos pavimentos é fundamental para a eficácia dos mesmos sob o ponto de vista estrutural e funcional. Nesse controle, as TUCs devem estar de acordo com as temperaturas obtidas nos projetos de misturas asfálticas. Estas temperaturas devem ser observadas em campo tendo em vista que algumas propriedades, como a viscosidade do CAP, serão diretamente afetadas. A temperatura do CAP utilizado na mistura, deve ser definida para cada tipo de CAP, em função da relação entre temperatura e viscosidade deste material.

#### 4.1.3.3. Grau de Desempenho (PG)

As amostras de CAP convencional e de CAP +2% LCC foram caracterizadas de acordo com o grau de desempenho (PG) à alta e à baixa temperatura. O grau de desempenho do CAP à alta temperatura tem como objetivo a correlação dos parâmetros viscoelásticos com o desempenho do CAP, portanto, verificou-se o comportamento do parâmetro  $G^*/\text{sen}\delta$  em função da temperatura. O grau de desempenho à alta temperatura corresponde à temperatura na qual o valor de  $G^*/\text{sen}\delta$  é superior a 1,0kPa antes do envelhecimento via RTFOT e superior a 2,2kPa após envelhecimento via RTFOT. Na avaliação dos resultados desse ensaio, conforme procedimento descrito pela ASTM D6373 (1999), considera-se o menor valor de temperatura adquirido após o envelhecimento em estufa do tipo RTFOT.

O grau de desempenho do CAP à baixa temperatura (BBR), para as amostras de CAP convencional e de CAP + 2% LCC, foi determinado após envelhecimento no PAV (vaso de envelhecimento sob pressão) e no RTFOT segundo procedimento descrito pela ASTM D6648 (2001). Aplicando o princípio da superposição tempo-temperatura, este ensaio pode ser realizado em 60s em uma temperatura 10°C inferior à temperatura



reportada (-18°C). Por esse motivo, as amostras de CAP convencional e de CAP + 2% LCC foram classificadas com relação à temperatura inferior do PG como -28°C.

O PG das amostras de CAP convencional e CAP + 2% LCC receberam a classificação PG 70-28. O primeiro número corresponde ao grau à alta temperatura indicando que o CAP possui propriedades físicas adequadas para ser aplicado até no máximo 70°C. O segundo número corresponde ao grau à baixa temperatura e significa que o CAP possui propriedades físicas adequadas para ser aplicado até no mínimo -28°C (Tabela 4.7).

Tabela 4.7 – Classificação das amostras de CAP convencional e CAP + 2% LCC por grau de desempenho (PG)

Ligante	Antes do envelhecimento		Após o envelhecimento RTFOT e PAV		PG
	RTFOT		Fluência BBR		
	T(°C) em que $G^*/\text{sen}\delta > 1\text{kPa}$	T(°C) em que $G^*/\text{sen}\delta > 2,2\text{kPa}$	Fluência BBR (°C) $S < 300\text{MPa}$ e $m > 0,3\text{MPa/s}$		
CAP convencional	70	70	-18		70-28
CAP + 2% LCC	70	70	-18		70-28

#### 4.1.3.4. Curva Mestra

A curva mestra representa o comportamento reológico do CAP relacionado com a frequência (ou tempo) de carregamento e, para a sua construção, aplica-se o PSTT que considera o CAP como um material termorreologicamente simples. Na análise de uma curva mestra, o efeito de uma frequência alta equivale ao efeito referente a baixas temperaturas e o efeito de uma frequência baixa equivale ao efeito a altas temperaturas (Bechara *et al.*, 2008).

As Figuras de 4.12 a 4.14 são referentes a análise de amostras de CAP convencional e CAP + 2% LCC, antes e após RTFOT através de curvas mestras. Utilizou-se o PSTT e 25°C como temperatura de referência.

O ângulo de fase mostra informações sobre a razão entre as respostas: (i) elástica e (ii) viscosa, durante o processo de cisalhamento. O módulo complexo possui relação com a rigidez do material em diferentes velocidades de cisalhamento. Valores elevados do módulo complexo indicam aumento na rigidez enquanto que valores baixos de ângulo de fase acarretarão em uma maior resposta elástica.

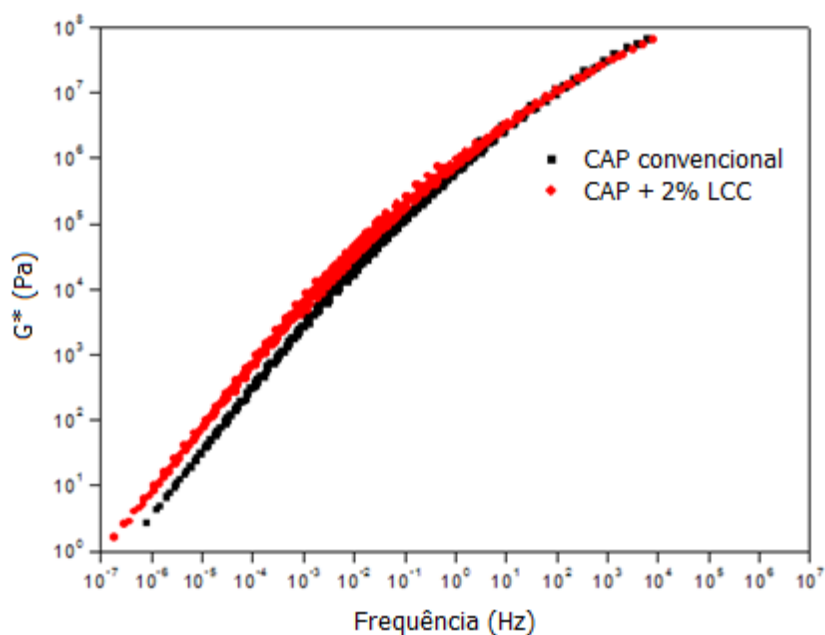
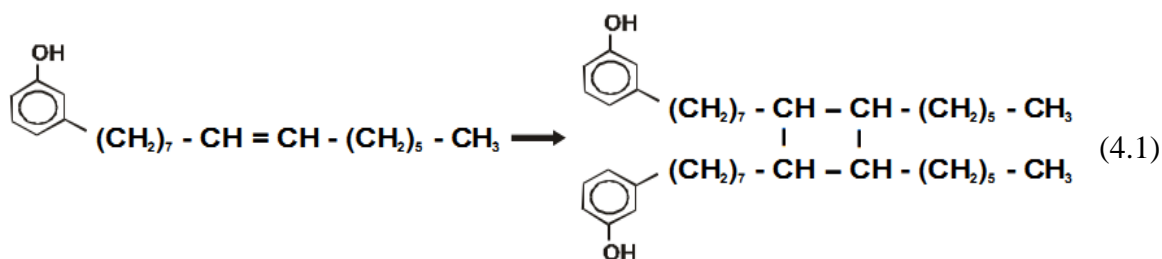


Figura 4.12 – Curva mestra ( $G^*$ ) para o CAP convencional e para o CAP + 2% LCC deste estudo

É possível verificar, na Figura 4.12, que a baixas temperaturas (ou frequências elevadas) as duas curvas se sobrepõem. Verifica-se que a amostra de CAP + 2% LCC apresenta valores de módulo complexo superiores se comparada à amostra de CAP convencional com diferenças de comportamento em temperaturas elevadas (ou frequências baixas), na qual se constata o aumento da rigidez até temperaturas intermediárias. Esse fato possivelmente está associado à reação de oligomerização em temperaturas elevadas (ou frequências baixas) durante o ensaio de viscosidade. Provavelmente, durante a oligomerização, ocorre a quebra das ligações duplas presentes na cadeia alifática do cardanol provocando o alinhamento destas cadeias (Equação 4.1).



Conforme visto anteriormente na Figura 4.6, o LCC proporcionou a redução da viscosidade interferindo nas propriedades reológicas do CAP. Rodrigues *et al.* (2009) e Alencar (2009) também observaram a redução da viscosidade ao analisarem amostras de CAP + 4% SBS + 1% LCC e CAP + 4% EVA + 2% LCC, respectivamente.

Na Figura 4.13, verifica-se a variação da  $\tan \delta$  para as amostras de CAP + 2% LCC e de CAP convencional. Observa-se que, também para este parâmetro, a diferença entre as amostras é maior em temperaturas elevadas, porém a baixas temperaturas, percebe-se que as duas curvas se sobrepõem. Estudos realizados por Rodrigues (2010) com amostras de CAP convencional e de CAP + 3% SBS + 1% LCC, constataram o mesmo comportamento quando se verificou que o CAP modificado com LCC e SBS diminuiu o valor da  $\tan \delta$  se comparado ao CAP convencional.

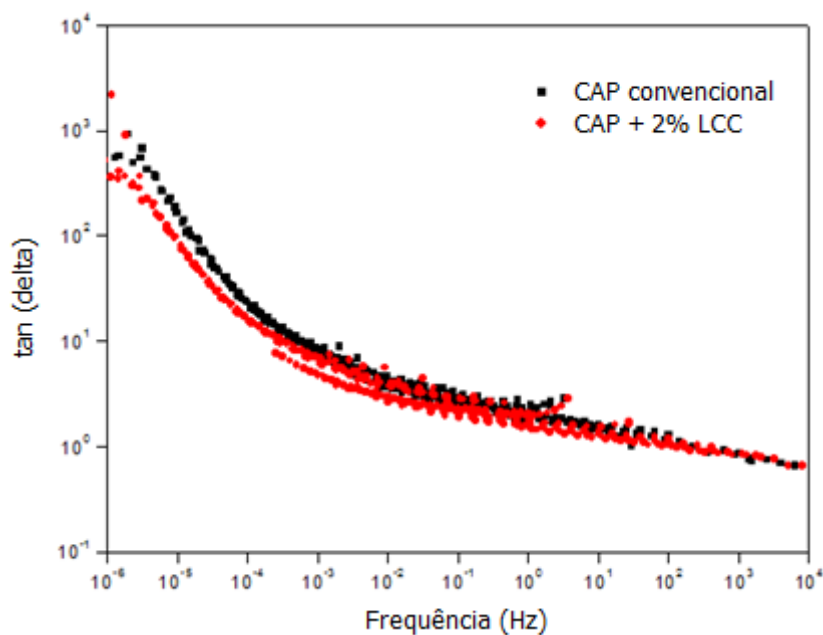


Figura 4.13 – Curva mestra de  $\tan(\delta)$  para o CAP convencional e para o CAP + 2% LCC deste estudo

O ângulo de fase representa a relação entre a resposta elástica e a viscosa durante o cisalhamento. O CAP + 2% LCC apresentou um pequeno aumento da elasticidade se comparado ao CAP convencional, sendo que essa variação foi verificada apenas em temperaturas elevadas (ou frequências baixas). Conforme Faxina *et al.* (2009), esse aumento da elasticidade pode apresentar vantagens com relação à durabilidade do revestimento asfáltico.

Analisando a Figura 4.14, verifica-se que o envelhecimento de curto prazo pelo RTFOT levou a uma diminuição da rigidez expressiva da amostra de CAP + 2% LCC em temperaturas intermediárias e baixas (ou frequências intermediárias e altas) se comparado ao CAP convencional. Esses resultados vão de encontro ao que foi dito por Bechara *et al.* (2008) e Alencar (2009) que afirmaram que as consequências do

envelhecimento são menos significativas em temperaturas intermediárias e baixas. Isso indica que o LCC pode estar de fato associado ou agindo como retardante de envelhecimento de misturas asfálticas. A diminuição da rigidez expressiva da amostra de CAP + 2% LCC a baixas temperaturas em relação à amostra de CAP convencional também pode estar possivelmente associada aos seguintes fatores: o efeito plástico e a estabilização dos asfaltenos devido ao efeito do envelhecimento.

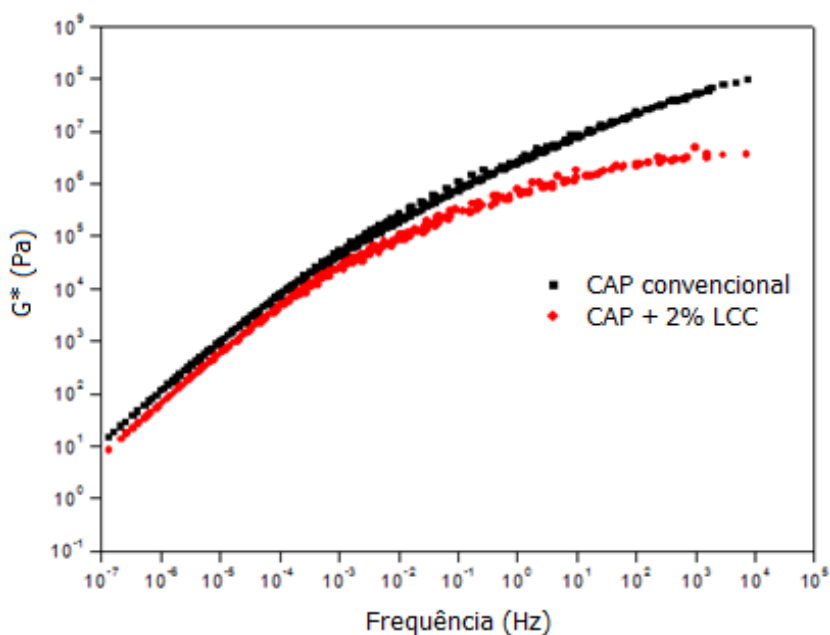


Figura 4.14 – Curva mestra ( $G^*$ ) para o CAP convencional e para o CAP + 2% LCC deste estudo após RTFOT

Conforme é possível visualizar na Figura 4.15, praticamente não se verificou diferença no comportamento dos materiais após o envelhecimento de curto prazo para as duas amostras de CAP analisadas. Percebe-se que, em frequências elevadas (ou baixas temperaturas), há uma ligeira elevação para a amostra de CAP + 2% LCC. Esse fato deve-se a menor estabilidade em frequências elevadas (ou baixas temperaturas). Alencar (2009) constatou o mesmo comportamento para amostras de CAP + 4% EVA e 2% LCC. Rodrigues (2010) analisou amostras de CAP convencional e CAP + 4% SBS + 1% LCC e verificou que a diferença de comportamento entre estas amostras com e sem envelhecimento não era significativa.

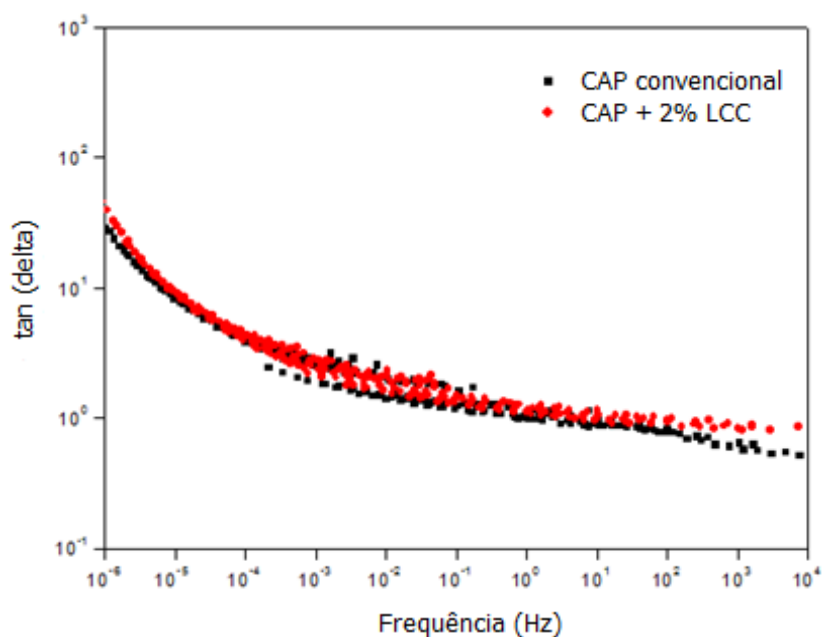


Figura 4.15 – Curva mestra de tan (delta) para o CAP convencional e para o CAP + 2% LCC, após RTFOT

## 4.2. Ensaios para Caracterização dos Agregados

### 4.2.1. Caracterização Tradicional dos Agregados

Os agregados foram submetidos aos seguintes ensaios de caracterização: (i) granulometria (DNER-ME 83/1998), (ii) abrasão *Los Angeles* (DNER-ME 35/1998), (iii) densidade do agregado gráudo e miúdo (DNER-ME 81/1998 e DNER-ME 84/1995), (iv) adesividade (DNER-ME 79/1994) e (v) índice de forma (DNER-ME 86/1994).

Para a realização do ensaio de abrasão *Los Angeles* (DNER-ME 35/1998), colocou-se as amostras de agregados gráudos juntamente com doze esferas de aço fundido de diâmetro de 47,6mm e massas entre 390g e 445g dentro do tambor. Submeteu-se o equipamento a 500 rotações com velocidade entre 30 e 33rpm. No tambor do equipamento, ocorreu o processo de abrasão dos agregados. Ao final deste ensaio, determinou-se a porcentagem em massa perdida comparada à massa inicial dos agregados, retidos na peneira N°12 (1,7mm).

No ensaio de adesividade (DNER-ME 79/1994) imergiu-se a mistura de CAP e agregados gráudos, em um frasco de vidro com água durante 72 horas em estufa a 40°C.

O resultado do ensaio, obtido visualmente, foi tido como satisfatório por não ter sido verificado nenhum deslocamento da película do filme de CAP após esse período.

O ensaio de índice de forma (DNER-ME 86/1994) foi realizado com auxílio de crivos redondos e redutores. O resultado é adimensional e pode variar de 0 a 1. Quanto mais próximo de 1, maior a cubicidade dos agregados. Quanto mais próximo de 0 for o resultado, mais lamelares são os agregados.

O ensaio de granulometria (DNER-ME 83/1998) consiste na determinação da distribuição das partículas de agregado pelo tamanho. A preparação da amostra para este ensaio consiste em secar o agregado na estufa e, em seguida, passar em uma série de peneiras padronizadas. Os agregados podem ser peneirados manualmente ou com a utilização de um peneirador mecânico. A distribuição dos diferentes tamanhos dos grãos é calculada através da comparação entre o material passante em cada peneira e o total da amostra ensaiada.

O ensaio de densidade aparente de agregados graúdos (DNER-ME 81/1998) consiste na determinação, através da massa dos agregados secos na estufa, da massa dos agregados com a Superfície Seca Saturada (SSS) e da massa dos agregados submersos em água. A massa específica é a relação entre a massa e o volume da parte impermeável de um agregado. Através do ensaio de densidade, determinou-se a absorção do agregado graúdo que foi calculado pela relação entre a massa inicial dos agregados secos e a massa de água absorvida pelos agregados imersos em água após 24 horas, à temperatura ambiente. Os resultados referentes à caracterização dos agregados são mostrados na Tabela 4.8.

Tabela 4.8 – Caracterização dos agregados deste estudo

Características	Agregados			
	Brita 3/4"	Brita 3/8"	Pó de pedra	Cal
Abrasão <i>Los Angeles</i> (%)	42,18	-	-	-
Absorção – graúdo (%)	0,62	1,20	-	-
Densidade real	2,664	2,663	2,650	2,700
Densidade aparente	2,621	2,582	-	-
Adesividade	Satisfatória		-	-
Índice de forma	0,66	-	-	-

#### 4.2.1. Caracterização Química dos Agregados

A mistura de agregados referentes às britas 3/4” e 3/8” e do pó de pedra foram submetidos a uma caracterização química. Realizou-se uma análise química semi-qualitativa (identificação dos elementos químicos presentes) e semi-quantitativa (identificação do teor de cada elemento). Para a realização desse ensaio, utilizou-se 1g da amostra de agregados (sem cal) passante na peneira N°200. Os resultados referentes à caracterização química dos agregados são mostrados na Tabela 4.9.

Tabela 4.9 – Caracterização química dos agregados

<b>Elemento Químico</b>	<b>Teor (%)</b>
Silício (Si)	61,90
Potássio (K)	18,00
Alumínio (Al)	12,14
Cálcio (Ca)	5,32
Ferro (Fe)	2,59
Rubídio (Rb)	0,05

Estes resultados estão de acordo com a natureza granítica dos agregados utilizados nesta pesquisa devido o elevado teor de silício (Si). Um teor elevado de Si faz com que o agregado seja mais ácido necessitando assim de compostos de natureza básica para que haja uma melhor adesão na interface CAP/agregados. Ribeiro *et al.* (2011) analisaram misturas asfálticas confeccionadas com agregados de natureza granítica (alto teor de silício) e calcária (baixo teor de silício) e constataram que a mistura com agregado granítico apresentou maior suscetibilidade ao dano por umidade se comparada à outra mistura.

Furlan (2006) analisou misturas asfálticas, dosadas de acordo com o método Marshall, constituídas de CAP 20 e pelos seguintes agregados: granítico, basáltico e gábrico. As misturas asfálticas com agregados graníticos apresentaram maior suscetibilidade à umidade.

Conforme visto na revisão bibliográfica, agregados ácidos como o granítico, apresentam elevado teor de silício e influenciam negativamente o desenvolvimento e manutenção das ligações adesivas com o CAP sendo designados de hidrofílicos. Contrariamente, agregados básicos, como o gábrico e o basáltico, por possuírem baixo teor de silício, tendem a apresentar ligações adesivas mais fortes com o CAP sendo designados de

hidrofóbicos. Portanto, a composição mineralógica dos agregados é um fator importante no que se refere à adesão e à suscetibilidade de misturas asfálticas ao dano por umidade.

#### 4.2.2. Caracterização dos Agregados com Relação à Angularidade, à Esfericidade e à Textura

Com o auxílio do *AIMS*, os agregados foram caracterizados com relação aos seguintes parâmetros: angularidade, esfericidade e textura. Foi utilizada a mistura de agregados (sem cal) retidos desde a peneira ½" até a peneira N°200. O ensaio de caracterização com relação aos parâmetros de esfericidade e textura foi realizado somente para os agregados graúdos enquanto que o ensaio de caracterização para o parâmetro de angularidade foi realizado para os agregados graúdos e miúdos. Os resultados para os parâmetros analisados, foram fornecidos pelo próprio equipamento e expressos em bases estatísticas como mostra a Tabela 4.10 e as Figuras de 4.16 a 4.18.

Tabela 4.10 – Resumo das análises de diferentes parâmetros de forma obtidos através do uso do *AIMS* para caracterização dos agregados deste estudo

Parâmetro	Frequência (%)		Classificação (Al Rousan, 2004)	Média	Desvio Padrão	CV (%)	Mediana
Angularidade	Baixa ( $\leq 3.300$ )	39,5	Sub	3.731,3	1.391,5	37	3.666,9
	Média (3.300 – 6.600)	58,4	Arredondados				
	Alta (6.600 – 10.000)	2,1	(2.100 – 4.000)				
Esfericidade	Baixa ( $\leq 0,3$ )	0	Baixa (0,6 – 0,7)	0,6	0,1	16	0,7
	Média (0,3 – 0,7)	67,7					
	Alta (0,7 – 1,0)	32,3					
Textura	Baixa ( $\leq 260$ )	41,8	Baixa	282,9	94,2	33	271,4
	Média (260 – 550)	56,7	Rugosidade				
	Alta (550 – 1.000)	1,5	(275 – 350)				

Com relação ao valor médio de angularidade encontrado (3.731,3), conforme Al Rousan (2004), os agregados foram classificados como sub arredondados (valores entre 2.100 e 4.000) não sendo, portanto, classificados como agregados angulares (acima de 5.400). Entretanto, vale ressaltar que 39,5% dos agregados possuem angularidade baixa, 58,4% possuem angularidade média e 2,1% possuem angularidade alta. Agregados angulares ou seja, com cantos agudos, promovem maior atrito e intertravamento entre os grãos, contudo agregados com grau de angularidade muito elevado, possuem cantos agudos



que podem perfurar o filme de CAP acarretando entrada de água na interface CAP/agregados. A Figura 4.16 mostra a distribuição de valores relacionados à angularidade dos agregados desta pesquisa.

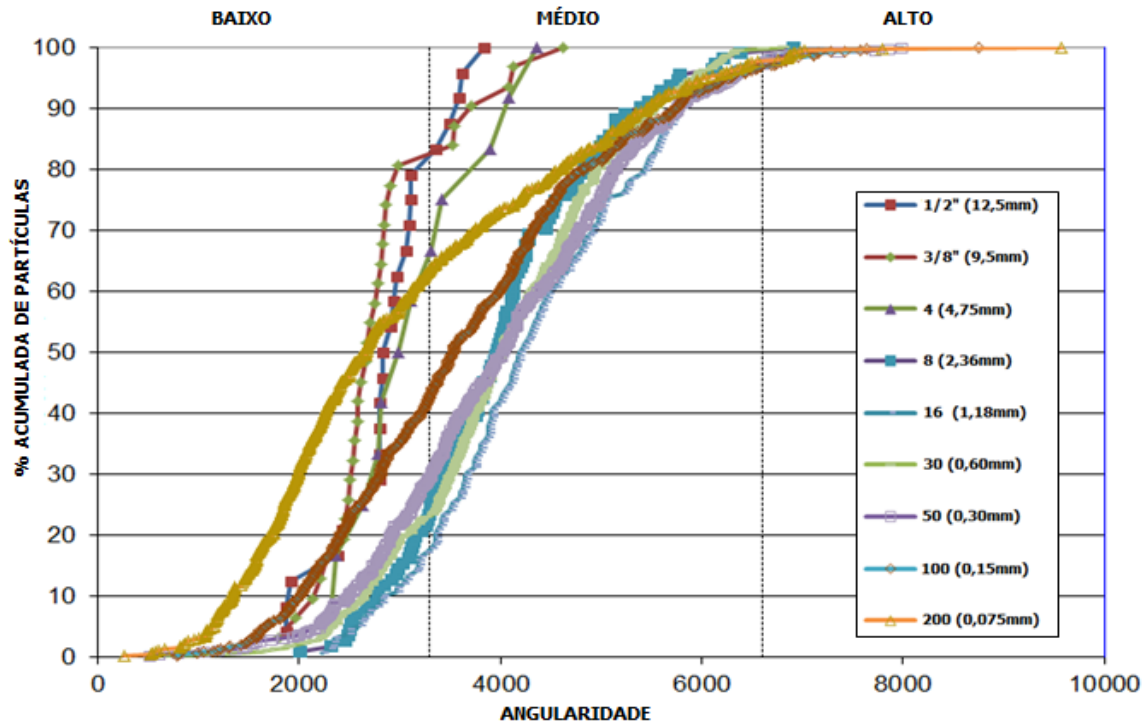


Figura 4.16 – Resultados do parâmetro de angularidade dos agregados deste estudo

A esfericidade é um parâmetro que expressa numericamente o grau de aproximação da forma do agregado da esfera perfeita. Quanto mais próximo de 1, mais esférica será a forma do agregado, o que não é desejável do ponto de vista de intertravamento entre os agregados. O valor médio de esfericidade encontrado (0,64), é classificado como baixo (entre 0,6 e 0,7), segundo Al Rousan (2004). Vale ressaltar que 67,7% dos agregados possuem esfericidade média, 32,3% possuem esfericidade alta, não tendo sido observado agregados com esfericidade baixa. A Figura 4.17 mostra a distribuição de valores relacionados à esfericidade dos agregados deste estudo.

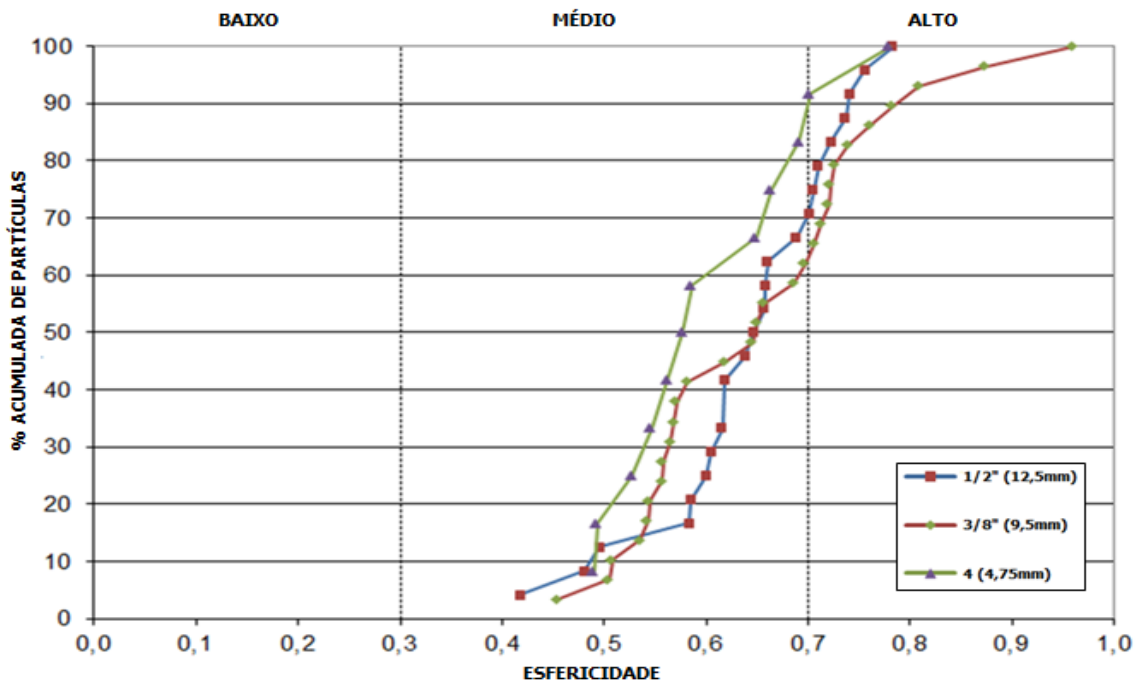


Figura 4.17 – Resultados do parâmetro de esfericidade dos agregados deste estudo

O valor médio encontrado para textura (282,90) é classificado, de acordo com Al Rousan (2004), como de baixa rugosidade (entre 275 e 350). Vale ressaltar que 41,8% dos agregados possuem textura baixa, 56,7% possuem textura média e 1,5% possuem textura alta. Com relação à textura, agregados com textura superficial rugosa proporcionam maior adesão com o CAP. Os resultados obtidos nesta pesquisa vão ao encontro dos valores obtidos por Gudimettela *et al.* (2006). Estes autores também analisaram misturas asfálticas com agregados graníticos sub arredondados (2.991) e baixa esfericidade (0,65). No entanto, com relação à textura, Gudimettela *et al.* (2006) obtiveram um valor de textura (239) que, segundo Al Rousan (2004), é classificado como liso (entre 165 e 275). Comparando-se os resultados obtidos nesta pesquisa com os valores encontrados por Gudimettela *et al.* (2006), espera-se que o esqueleto mineral do presente estudo possa garantir um melhor desempenho com relação ao dano por umidade. Vale ressaltar que, assim como o ensaio de esfericidade, este ensaio utiliza apenas agregados graúdos. Entretanto, Masad *et al.* (2001) afirmaram que, indiretamente, a angularidade dos agregados miúdos pode ser utilizada como um indicativo para a textura ou seja, valores baixos de angularidade implicam em baixa textura, valores médios de angularidade implicam em uma textura média e assim sucessivamente. A Figura 4.18 mostra a distribuição de valores relacionados à textura dos agregados.

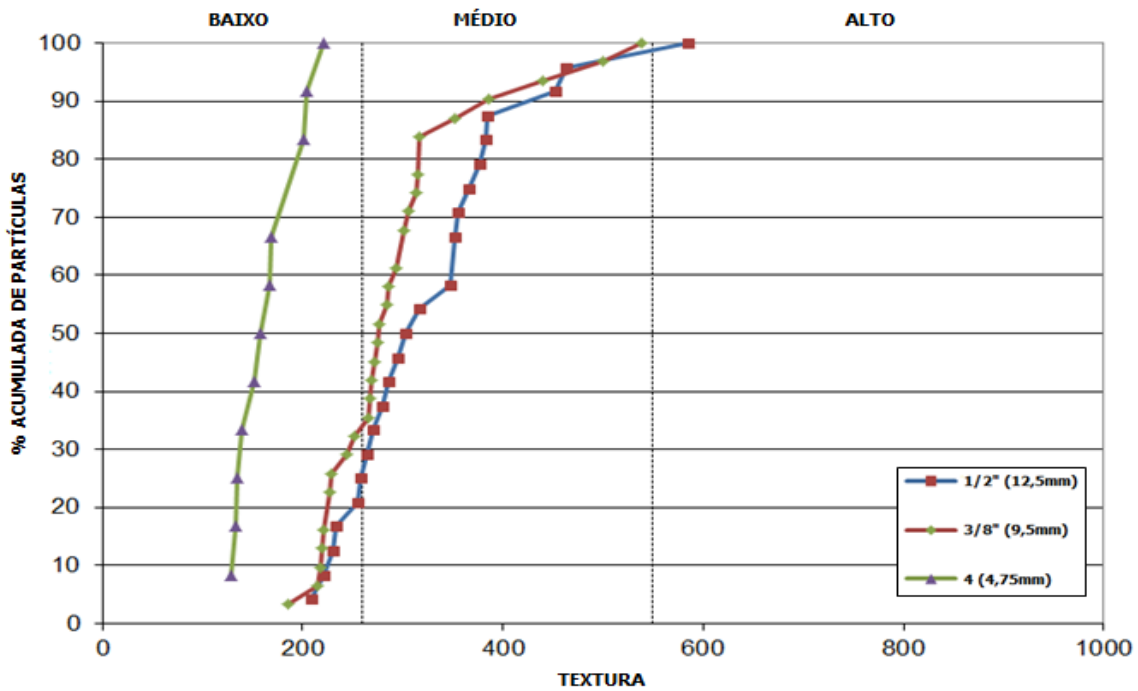


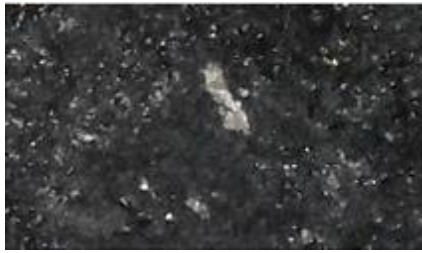
Figura 4.18 – Resultados do parâmetro de textura dos agregados deste estudo

#### 4.2.3. Processamento Digital de Imagens (PDI)

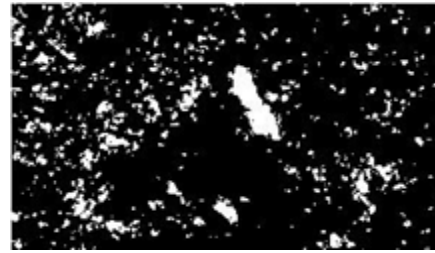
Utilizou-se a técnica de PDI, baseada na análise de imagens, com o objetivo de classificar visualmente as misturas asfálticas com relação ao deslocamento da película de CAP após o condicionamento do ensaio *Lottman* modificado. As fotos foram obtidas com auxílio de uma câmera digital para cada tipo de mistura analisada contendo CAP convencional, CAP + 2% LCC e CAP convencional e 2% cal como fíler. Vale salientar que, as fotos foram obtidas apenas de CPs condicionados e após a realização do ensaio *Lottman* modificado. Para a realização deste ensaio utilizou-se um total de cinco imagens para cada mistura.

As imagens foram cortadas e em seguida transformadas em preto e branco. A Figura 4.19 mostra as imagens das misturas analisadas antes e após o tratamento de imagem. A área preta representa os agregados cobertos com CAP e a área branca representa os agregados quebrados ou as manchas de CAP sobre os mesmos. Vale salientar que, as manchas de CAP são referentes ao processo de deslocamento da película de CAP e resultam do processo de condicionamento aplicado no ensaio *Lottman* modificado na qual foram submetidas as misturas asfálticas analisadas (Pinto, 2009). Utilizou-se o *software ImageTool* para o cálculo referente às áreas de cada cor. O *ImageTool* identifica a cor de cada *pixel* na imagem e fornece a porcentagem de *pixels* preto ou

branco. A Figura 4.19 mostra os valores obtidos através da análise das imagens deste estudo.



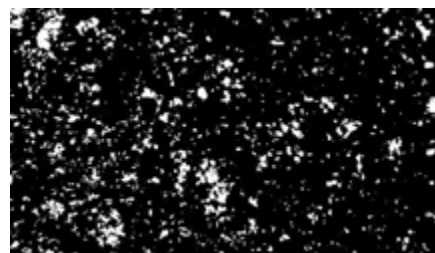
CAP convencional antes do tratamento da  
imagem



CAP convencional após tratamento da  
imagem



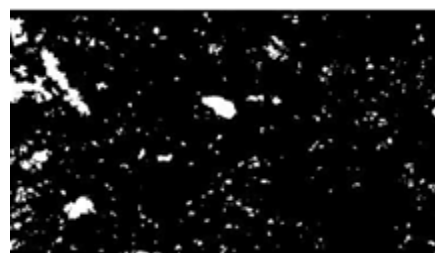
CAP + 2% LCC antes do tratamento da  
imagem



CAP + 2% LCC após tratamento da  
imagem



CAP e 2% de cal antes do tratamento da  
imagem



CAP e 2% de cal após tratamento da  
imagem

Figura 4.19 – Exemplo de imagens analisadas das misturas deste estudo

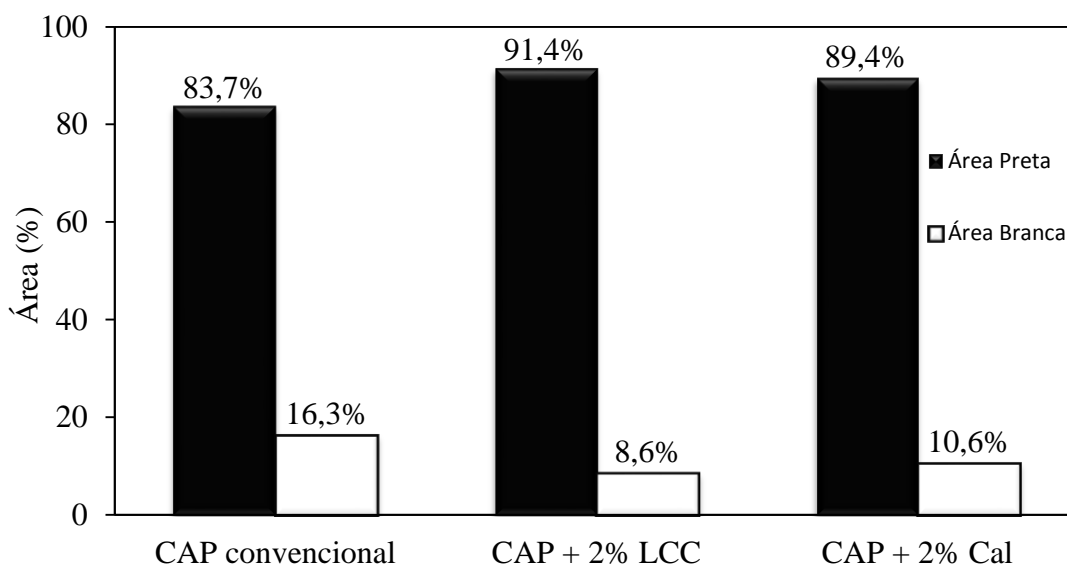


Figura 4.20 – Resultados do percentual médio de CAP deslocado das misturas asfálticas analisadas após a utilização do ensaio *Lottman* modificado

Conforme é possível visualizar na Figura 4.20, entre as misturas analisadas, a mistura contendo CAP convencional apresentou maior porcentagem de área branca se comparada às outras misturas. As áreas brancas representam os agregados quebrados após a realização do ensaio *Lottman* modificado. Entretanto, a mistura contendo CAP + 2% LCC apresentou melhor desempenho com relação ao deslocamento da película de CAP. Essa mistura apresentou 7,7% de área preta a mais se comparada à mistura contendo CAP convencional e 2,0% de área preta a mais se comparada à mistura de CAP + 2% de cal como fíler. Isso implica que a mistura com CAP + 2% LCC tende a proporcionar maior grau de cobertura dos agregados com CAP em relação às demais misturas avaliadas.

### 4.3. Ensaio de Caracterização da Mistura Asfáltica

#### 4.3.1. Dosagem e Caracterização das Misturas Asfálticas

Foram dosadas, através da metodologia Superpave, três misturas asfálticas com três CAP distintos: CAP convencional, CAP + 2% LCC e CAP convencional utilizando 2% de cal como fíler artificial. Os agregados utilizados são de natureza granítica. Em cada caso, foram compactados oito CPs sendo dois referentes ao teor de CAP estimado menos 0,5%, dois no teor de CAP de projeto estimado, dois no teor de CAP estimado mais 0,5% e dois no teor estimado de CAP mais 1%. Para cada teor de CAP, determinou-se a  $G_{mm}$  e o  $V_v$  da mistura para um  $N_{projeto}$  equivalente a 100 giros. As

misturas foram dosadas para que o Vv das misturas estivessem dentro do intervalo de  $4\% \pm 0,4\%$ . A Tabela 4.11 mostra os resultados referentes aos parâmetros da dosagem Superpave para as misturas asfálticas analisadas.

Tabela 4.11 – Parâmetros de dosagem das misturas asfálticas

Parâmetro	Mistura			Limites DNIT 031/06 (%)
	CAP convencional	CAP + 2% LCC	CAP + 2% Cal	
Teor de CAP (%)	6,0	6,0	5,5	-
Vv (%)	4,3	3,7	3,6	3 - 5
RBV (%)	76,0	78,5	74,7	75 - 82
VAM (%)	17,8	17,3	14,1	-
VCB (%)	13,5	13,6	10,5	-
$G_{mm}$	2,414	2,414	2,441	-
$G_{mb}$	2,311	2,324	2,345	-

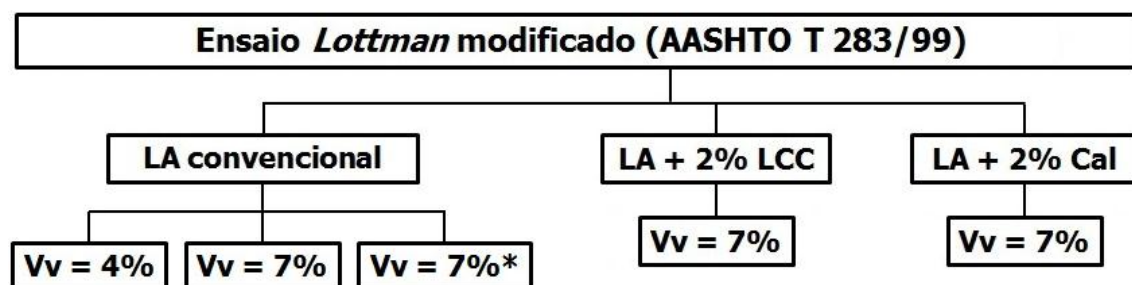
A mistura com CAP + 2% cal como fíler, apresentou um teor de CAP de projeto 0,5% inferior se comparado ao teor de projeto da mistura dosada contendo CAP convencional. Esse resultado está coerente com o resultado obtido por Budny (2009) que analisou misturas asfálticas com 1% de cal dolomítica tipo I e tipo II como fíleres em substituição ao pó de pedra. Budny (2009) obteve uma diferença de 0,5% do teor de CAP de projeto para as duas misturas com cal se comparadas à mistura dosada contendo CAP convencional. A diferença de 0,5% entre o teor de CAP de projeto da mistura com cal comparada à mistura contendo CAP convencional encontrado nesta pesquisa é satisfatória se comparado com as diferenças encontradas por Granich (2010). Este autor analisou misturas asfálticas constituídas de 2% de cal dolomítica, 1 e 2% de cal calcítica como fíleres em substituição ao pó de pedra. Granich (2010) obteve as seguintes diferenças no teor de projeto das misturas com cal se comparadas à mistura contendo CAP convencional: 0,25% inferior para a mistura com 2% de cal dolomítica, 0,20% inferior para a mistura com 1% de cal calcítica e 0,15% superior para a mistura com 2% de cal calcítica. Vale ressaltar que as misturas asfálticas analisadas por Budny (2009) e Granich (2010) eram constituídas de CAP 50/70 e agregados basálticos dosadas segundo o método Marshall.

A mistura contendo CAP + 2% LCC apresentou o mesmo teor de CAP de projeto da mistura dosada contendo CAP convencional. Esse resultado vai de encontro com o resultado obtido por Rodrigues (2010). Esta autora ao analisar uma mistura asfáltica

contendo CAP + 4% SBS + 1% LCC, obteve um teor de CAP de projeto 0,2% superior se comparado aquele encontrado para a mistura contendo CAP convencional. Vale ressaltar que, na presente pesquisa, apenas o LCC vem sendo utilizado como modificador do CAP. No caso da pesquisa realizada por Rodrigues (2010), a presença do SBS pode ter contribuído para este resultado.

#### 4.3.2. Ensaio *Lottman* modificado

Este ensaio foi realizado conforme o procedimento descrito segundo a AASHTO T 283 (1999). Foram utilizadas misturas com CAP convencional, CAP + 2% LCC e CAP + 2% de cal como fíler. As misturas asfálticas analisadas neste ensaio foram dosadas de acordo com o método Superpave e  $V_v = 7\%$ . A mistura contendo CAP convencional foi compactada com diferentes  $V_v$  (4 e 7%). Dez amostras divididas em dois grupos (condicionado e não condicionado) foram ensaiadas. Submeteu-se ainda a mistura contendo CAP convencional, dosada através da metodologia Superpave e com  $V_v = 7\%$ , a um ciclo de resfriamento de  $10^\circ\text{C}$ , diferente da temperatura de  $-18^\circ\text{C}$  preconizada pela AASHTO T 283/99. A Figura 4.21 mostra um fluxograma referente aos ensaios realizados. Os resultados são apresentados na Tabela 4.12 e visualizados na Figura 4.22. A linha negra estabelece o limite mínimo de  $\text{RRT} = 80\%$  adotado neste estudo.



\* Mistura asfáltica submetida a ciclo de resfriamento a  $10^\circ\text{C}$

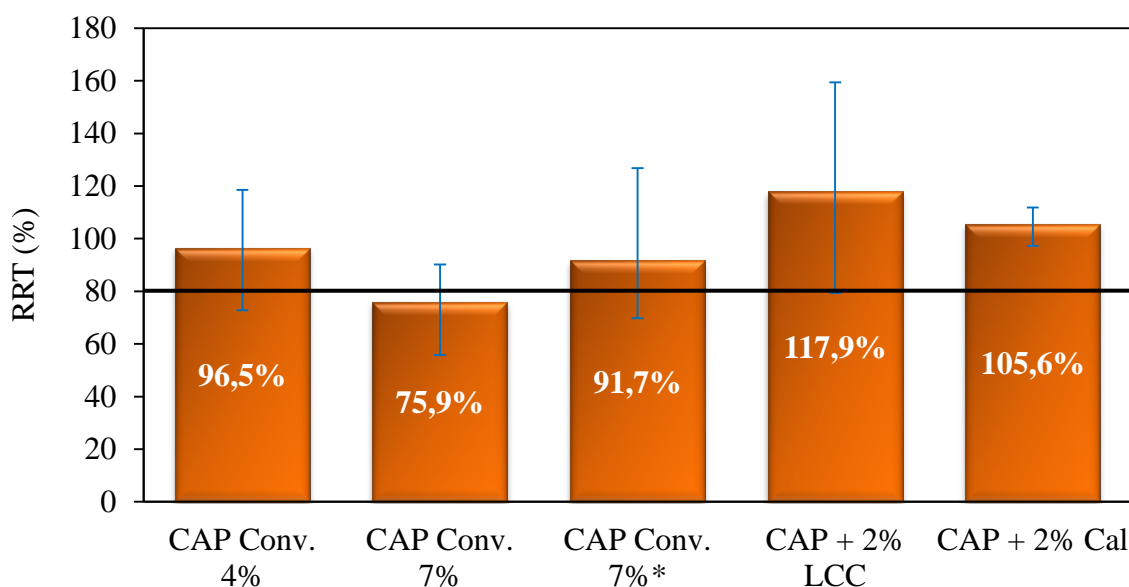
Figura 4.21 – Fluxograma do ensaio *Lottman* modificado

Tabela 4.12 – Resultados do ensaio *Lottman* modificado

Mistura	Teor de CAP (%)	Vv (%)	Resistência à Tração (RT)						RRT (%)
			Não Condicionado			Condicionado			
			Média (MPa)	Desvio Padrão	CV (%)*	Média (MPa)	Desvio Padrão	CV (%)	
CAP convencional	6,0	4	0,87	0,08	9	0,84	0,08	9	96,5
		7	0,66	0,05	8	0,50	0,06	11	75,9
		7	0,58	0,05	8	0,54**	0,10	19	91,7
CAP + 2% LCC	6,0	7	0,65	0,05	8	0,76	0,06	9	117,6
CAP + 2% Cal	5,5	7	0,57	0,02	4	0,61	0,01	2	105,6

\* CV = Coeficiente de Variação

\*\* Mistura asfáltica submetida a ciclo de resfriamento com temperatura de 10°C



\* Mistura asfáltica submetida a ciclo de congelamento com temperatura de 10°C

Figura 4.22 – Relação entre a Resistência à Tração (RRT) para as misturas asfálticas

Tendo em vista os valores de RRT encontrados, a mistura contendo CAP convencional com  $V_v=7\%$ , foi a única mistura considerada não aceitável de acordo com o limite mínimo de RRT adotado (80%). Como já era esperado, a mistura contendo CAP convencional com  $V_v=4\%$  dosada pelo método Superpave, apresentou RRT 21% superior se comparada a mistura com  $V_v=7\%$ . Isso se deve a presença de água entre os vazios interconectados da mistura asfáltica quando os vazios são maiores. Por esse motivo, o ensaio descrito pela AASHTO T 283/99 recomenda que as amostras ensaiadas estejam com  $V_v$  entre 6 e 8% para que se possa verificar a influência do efeito deletério da água numa situação desfavorável. Dessa forma, as misturas asfálticas com  $V_v$  em torno de 4% apresentam menor quantidade de vazios, diminuindo a presença de



água entre os vazios da mistura. Furlan (2006) também observou que o aumento do Vv de 4 para 7% acarretou em uma maior sensibilidade ao dano por umidade. Arambula (2007) afirmou que as misturas com maior Vv apresentam um maior grau de conexão entre os vazios e, conseqüentemente, uma maior suscetibilidade ao dano por umidade. Masad *et al.* (2009) avaliaram misturas asfálticas com  $Vv = 7\%$  dosadas pelo método Superpave, com agregados de natureza calcária provenientes da Flórida e de natureza granítica provenientes da Geórgia. Estes autores observaram que o tamanho médio dos vazios conectados era maior do que o tamanho médio total de vazios não conectados.

A mistura confeccionada contendo CAP convencional ensaiada com ciclo de resfriamento de  $10^{\circ}\text{C}$  apresentou valor de RRT aproximadamente 16% superior se comparada à outra mistura dosada pelo mesmo método porém com a temperatura do ciclo de congelamento de  $-18^{\circ}\text{C}$  e mesmo Vv. Freitas (2010) enfatiza que a adoção de ciclo de congelamento normatizado de  $-18^{\circ}\text{C}$  possui pouca representatividade tendo em vista que o congelamento em revestimentos brasileiros é restrito a poucas localidades e períodos.

A mistura asfáltica contendo CAP + 2% LCC apresentou maior valor de RRT se comparada às outras misturas contendo CAP convencional inclusive aquela que utilizou a cal como fíler. A mistura contendo CAP modificado com LCC apresentou RRT aproximadamente 42% superior se comparado à mistura contendo CAP convencional e RRT aproximadamente 12% superior à mistura com CAP + 2% cal como fíler. Isso possivelmente é devido às propriedades surfactantes do LCC que proporcionaram maior compatibilidade entre CAP e agregados (Nadkarni *et al.*, 1985).

A mistura contendo CAP + 2% cal apresentou aumento de RRT da ordem de 30%, se comparada à mistura contendo CAP convencional. Budny (2009) obteve aumento da RRT da ordem de 9,2% para a mistura com cal calcítica comparada à mistura contendo CAP convencional. Granich (2010) obteve aumento da RRT da ordem de 22% para a mistura com cal calcítica se comparada à mistura contendo CAP convencional. Vale ressaltar que as misturas asfálticas analisadas por estes autores eram constituídas de CAP 50/70 e agregados basálticos. A amostragem foi realizada com quatro CPs. As misturas analisadas por Bock (2009) e Budny (2009) utilizaram 1% de cal como fíler artificial e Granich (2010) utilizou 2% de cal como fíler artificial. Os resultados obtidos na presente pesquisa também mostraram que a mistura com CAP + 2% cal apresentou

valor de RRT superior a 100%, assim como verificado por Furlan (2006) e Bock (2009), que analisaram misturas asfálticas com cal constituídas de CAP 50/70 e agregados graníticos. Furlan (2006) e Bock (2009) também obtiveram valores de RRT da ordem de 108 e 109%, respectivamente. No entanto, vale salientar que estes autores utilizaram 1% de cal como fíler artificial e que o valor de RRT, associado ao trabalho de Bock (2009), foi calculado pelo autor deste trabalho a partir dos valores de RT reportados.

Durante a realização deste ensaio, verificou-se que as misturas com CAP + 2% LCC e CAP convencional e 2% de cal como fíler, apresentaram valores de RT referentes ao grupo condicionado superiores ao grupo não condicionado e, conseqüentemente, valores de RRT superiores a 100%. Esse fato também foi verificado por Moura (2001), Gouveia *et al.* (2004), Furlan (2006), Furlan *et al.* (2007), Furlan *et al.* (2008), Bock (2009) e Freitas (2010). Isso, possivelmente, está associado à variabilidade do próprio ensaio de RT associado a fatores como a faixa de variação do Vv (6 a 8%) e o grau de saturação (55 a 80%) estabelecidos na AASHTO T 283/99. O efeito deletério da água é completamente dependente da estrutura interna da amostra tais como o grau de conectividade e o tamanho dos vazios. Todos os fatores mencionados podem ter facilitado a entrada da água assim como o deslocamento da película de CAP nas misturas asfálticas analisadas.

Diante dos resultados de RRT obtidos nesta pesquisa e das variações existentes nos resultados das amostras condicionadas e não condicionadas, determinou-se uma faixa de variação entre as amostras condicionadas e não condicionadas para cada mistura analisada. Selecionou-se cada valor de RT do grupo condicionado e dividiu-se por cada valor do RT do grupo não condicionado. Para cada resultado obtido, multiplicou-se por 100 obtendo-se novos valores de RRT. Esse cálculo também foi feito para as outras amostras condicionadas totalizando 25 valores de RRT. Através desse procedimento obteve-se a faixa de variação selecionando-se os valores mínimo e máximo de RRT. A Tabela 4.13 mostra os resultados das faixas de variação para as misturas analisadas. A representação esquemática do procedimento utilizado para a realização dos cálculos é mostrada na Figura 4.23.

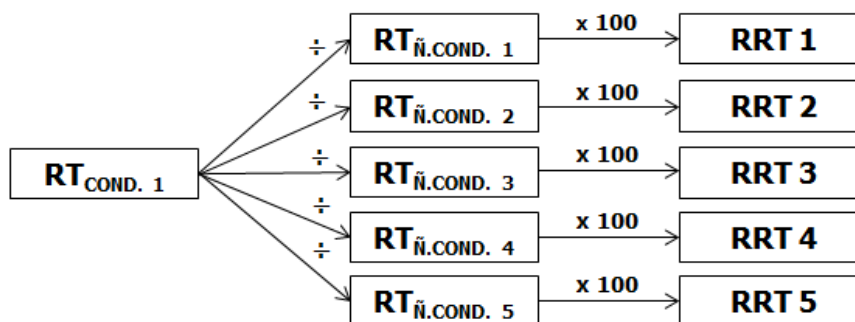


Figura 4.23 – Representação esquemática para o cálculo da faixa de variação de RRT

Tabela 4.13 – Resultados das faixas de variação dos resultados do ensaio *Lottman* modificado das amostras deste estudo

Mistura	Vv (%)	Teor de CAP (%)	RRT (%)	Faixa de Variação de RRT (%)
	4		96,5	72,8 - 118,5
CAP convencional	7	6,0	75,9	55,7 - 90,2
	7		91,7*	69,8 - 126,8
CAP + 2% LCC	7	6,0	117,9	79,4 - 159,4
CAP + 2% Cal	7	5,5	105,6	97,2 - 111,8

\* Mistura asfáltica submetida a ciclo de resfriamento com temperatura de 10°C

A mistura com CAP + 2% LCC apresentou maior variação de RRT (80%), enquanto a mistura com 2% de cal como fíler apresentou menor variação de RRT (15%). A faixa de variação evidencia o grau de empirismo desse tipo de ensaio. A penetração da água é muito influenciada pela distribuição de vazios na amostra. Durante o processo de compactação, não há como saber como os vazios estão distribuídos, apenas se tem conhecimento a respeito da quantidade total destes na mistura. Um maior grau de conexões entre os vazios facilita a entrada da água na mistura e conseqüentemente aumenta a suscetibilidade ao dano por umidade (Arambula, 2007).

#### 4.3.3. Módulo de Resiliência (MR)

O ensaio de MR foi realizado conforme o procedimento descrito na DNIT-ME 135 (2010). Foram utilizadas novamente as misturas com os três CAP: convencional, modificado com 2% de LCC e convencional e 2% de cal como fíler. As misturas asfálticas analisadas neste ensaio foram dosadas de acordo com a metodologia Superpave, Vv = 4%. Para cada mistura foram avaliados dez CPs divididos em dois grupos (condicionado e não condicionado). Os resultados obtidos, referentes à média aritmética de cinco CPs, são mostrados na Tabela 4.14 e melhor visualizados na Figura

4.24. A linha negra estabelece o valor de RMR = 70% como critério mínimo de aceitação adotado nesta pesquisa (Furlan *et al.*, 2004; Gouveia *et al.*, 2004; Furlan, 2006; Zegarra, 2007; Pilati, 2008).

Tabela 4.14 – Resultados do ensaio de MR das amostras deste estudo

Mistura	Teor de CAP (%)	Não Condicionado			Condicionado			RMR (%)
		Média (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	CV (%)	Média (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	CV (%)	
CAP convencional	6,0	2.829	327	12	2.157	222	10	76,2
CAP + 2% LCC	6,0	3.090	125	4	3.446	160	5	111,5
CAP + 2% Cal	5,5	3.758	109	3	3.731	320	9	99,3

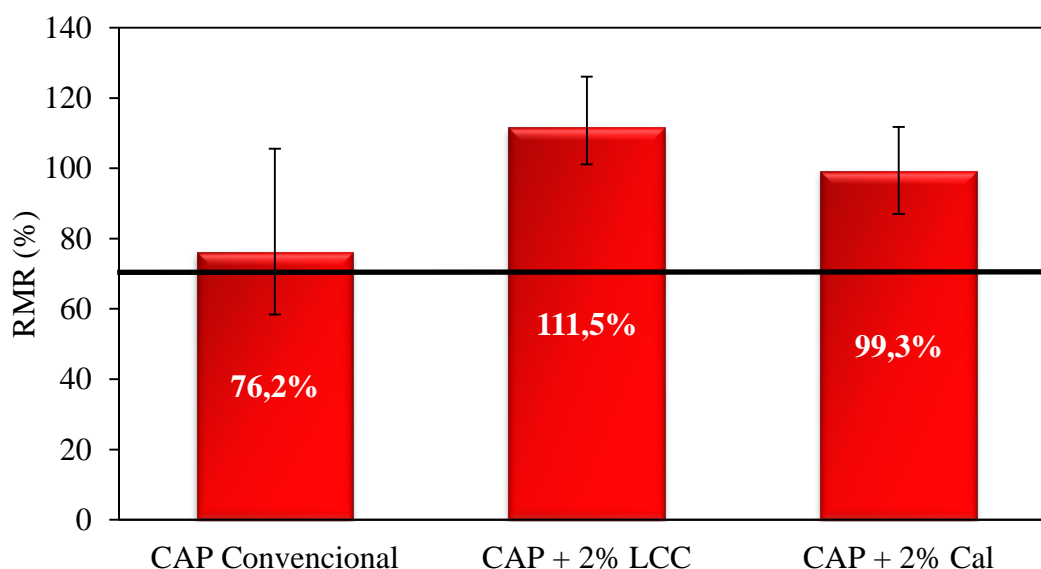


Figura 4.24 – Relação entre o Módulo de Resiliência (RMR) para as misturas asfálticas deste estudo

Tendo em vista os valores de RMR encontrados, verifica-se que todas as misturas foram consideradas aceitáveis. Observa-se que a mistura com CAP + 2% LCC obteve melhor desempenho se comparada às outras misturas analisadas. A mistura com 2% de cal como fíler artificial obteve RMR 12,2% inferior se comparada à mistura com CAP + 2% LCC e RMR 23,1% superior à mistura contendo CAP convencional. Esses resultados são superiores aos resultados obtidos por Furlan (2006), que obteve um aumento da ordem de 6% de RMR ao analisar uma mistura com 1% de cal como fíler artificial comparada à mistura contendo CAP convencional. A partir dos resultados referentes ao MR condicionado e não condicionado obtidos por Furlan *et al.* (2008),

calculou-se o RMR (97,2%) que foi inferior ao RMR de 99,3% obtido nesta pesquisa. Vale ressaltar que Furlan *et al.* (2008) utilizaram 1% de cal como fíler artificial em misturas asfálticas constituídas de CAP 50/70 com teor de projeto de 5,5% e agregados graníticos.

Analisando-se apenas os valores de MR referentes ao grupo não condicionado, nota-se que a mistura com cal apresentou MR 8,3 e 73,0% superiores se comparada às misturas com CAP + 2% LCC e contendo CAP convencional, respectivamente. Nuñez *et al.* (2007) também verificaram que as misturas com 2% de cal produziram MR 81,0% superior se comparadas à mistura contendo CAP convencional. Ressalta-se que estes autores analisaram misturas asfálticas constituídas de agregados graníticos, CAP convencional 50/70, 5,5% de teor de CAP de projeto, 2% de cal como fíler artificial e amostragem de três CPs. Granich (2010) observou que a mistura com cal proporcionou um MR 15,6% superior se comparada à mistura contendo CAP convencional. Deve se ressaltar que Granich (2010) analisou misturas asfálticas não condicionadas constituídas de CAP 50/70 com teor de CAP de projeto de 6,1%, agregados graníticos com 2% de cal como fíler artificial e amostragem de quatro CPs. Constata-se que, mesmo utilizando um teor de CAP de projeto maior (6,1%) do que o teor de 5,5% utilizado nesta pesquisa, o aumento de MR encontrado por Granich (2010) foi menor se comparado ao aumento de 73,0% do valor de MR obtido nesta pesquisa, se comparado à mistura contendo CAP convencional.

A mistura com CAP + 2% LCC referente ao grupo não condicionado apresentou um MR 9,2% superior se comparada à mistura contendo CAP convencional. Esse resultado vai de encontro ao resultado obtido por Alencar (2009). Esta autora analisou uma mistura asfáltica de CAP + 4% EVA + 2% LCC com valor de MR 8,6% inferior se comparada à mistura contendo CAP convencional. A redução de 12,1% no MR verificada nesta pesquisa, se comparada à mistura contendo CAP convencional não condicionada, ficou um pouco aquém da redução de MR observada por Rodrigues (2010). Esta autora, ao analisar uma mistura asfáltica não condicionada de CAP + 4% SBS + 1% LCC, verificou uma redução de 15,6% do valor de MR se comparada à mistura contendo CAP convencional. A mistura com CAP + 2% LCC, apresentou valores de MR referentes ao grupo condicionado maiores se comparada ao grupo não condicionado e, conseqüentemente RMR superior a 100%. Esse fato também foi

verificado por Moura (2001), Furlan (2006), Zegarra (2007), Pilati (2008) e Bock (2009). Possivelmente, este fenômeno está associado à própria variabilidade do ensaio de MR e, como este ensaio é realizado para baixos níveis de tensões, provavelmente este parâmetro pode não ter sido deteriorado com a presença da água.

Semelhante ao que foi feito no ensaio *Lottman* modificado, determinou-se uma faixa de variação de RMR para cada mistura utilizada. Selecionou-se cada valor de MR do grupo condicionado e dividiu-se para cada valor de MR do grupo não condicionado. Para cada resultado obtido, multiplicou-se por 100 obtendo-se novos valores de RMR. Esse cálculo também foi feito para as outras amostras condicionadas totalizando 25 valores de RMR. Através desse procedimento obteve-se a faixa de variação selecionando-se os valores mínimo e máximo de RMR. A Tabela 4.15 mostra os resultados das faixas de variação de RMR das misturas analisadas.

Tabela 4.15 – Resultados das faixas de variação de RMR deste estudo

Mistura	Teor de CAP (%)	RMR (%)	Faixa de Variação de RMR (%)
CAP convencional	6,0	76,2	58,4 - 105,5
CAP + 2% LCC	6,0	111,5	101,1 - 126,1
CAP + 2% Cal	5,5	99,3	87,0 - 111,8

As misturas contendo 2% de cal como fíler e a contendo CAP modificado com LCC apresentaram praticamente as mesmas variações: 24,8 e 25,0%, respectivamente. Por outro lado, a mistura contendo CAP convencional foi a mistura que apresentou a maior variação de RMR (47,1%). Vale salientar que, o MR não representa um parâmetro puramente elástico tendo em vista que, para o cálculo relacionado a um determinado pulso de carga, são perceptíveis as deformações de natureza viscoelásticas que são parcialmente contabilizadas como deformações elásticas (Bernucci *et al.*, 2007).

#### 4.3.4. Relação MR/RT

A relação entre MR e RT de uma mistura asfáltica é uma análise empírica da compatibilidade entre rigidez e resistência. O menor valor da relação MR/RT implica em maior flexibilidade associada a uma boa resistência à tração para a mistura. Portanto, é desejável a obtenção de um valor pequeno dessa relação tendo em vista que a baixa rigidez evita absorção elevada de tensões que tendem a levar o revestimento ao trincamento prematuro e a alta resistência à tração implica numa maior resistência à

ruptura (Bernucci *et al.*, 2007; Budny, 2009). Os valores de MR/RT para as misturas analisadas são mostrados na Tabela 4.16. Estes resultados podem ser melhor visualizados na Figura 4.25.

Tabela 4.16 – Resultados de MR/RT

Mistura	Teor de CAP (%)	Resistência à Tração (MPa)		Módulo de Resiliência (MPa)		Relação MR / RT	
		Não Cond.	Cond.	Não Cond.	Cond.	Não Cond.	Cond.
CAP convencional	6,0	0,66	0,50	2.829	2.160	4.313	4.319
CAP + 2% LCC	6,0	0,65	0,76	3.090	3.446	4.767	4.507
CAP + 2% Cal	5,5	0,61	0,57	3.757	3.731	6.205	6.505

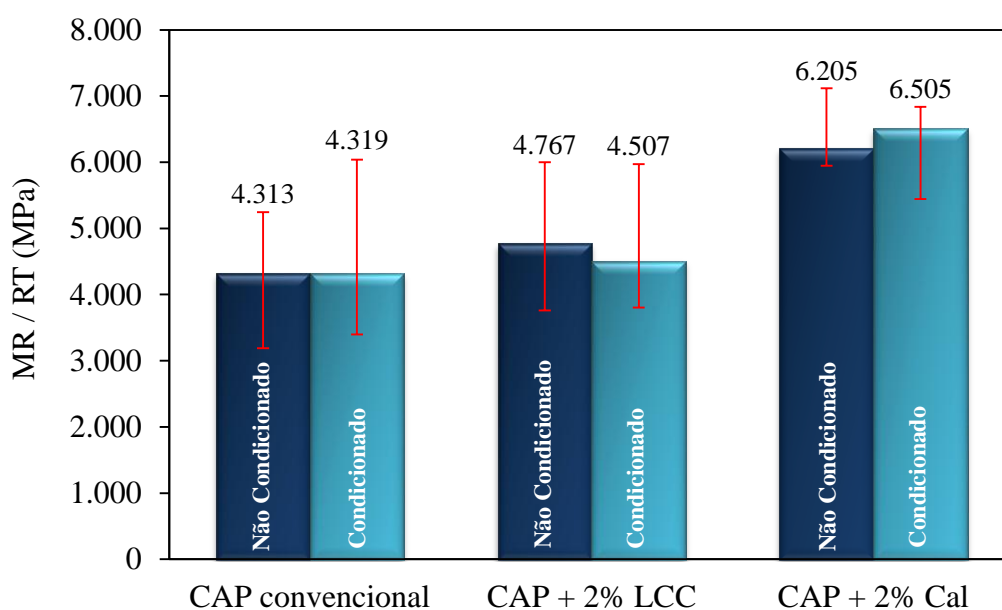


Figura 4.25 – Relação MR/RT

Analisando as misturas condicionadas, nota-se que a mistura contendo CAP convencional apresentou o menor valor de MR/RT (4.319) se comparada às outras misturas analisadas. Entre as misturas não condicionadas, a mistura contendo CAP convencional também apresentou menor valor de MR/RT (4.313) se comparada às outras misturas asfálticas.

A mistura com CAP + 2% LCC apresentou MR/RT 4% superior para as amostras condicionadas e MR/RT 10% superior para as amostras não condicionadas se comparada à mistura contendo CAP convencional. Alencar (2009) analisou uma mistura de CAP + 4% EVA + 1% LCC e obteve redução de 18% no valor de MR/RT se comparada à mistura contendo CAP convencional. Rodrigues (2010) obteve um valor

de MR/RT 11% inferior se comparada à mistura contendo CAP convencional. As misturas analisadas por Alencar (2009) e Rodrigues (2010) eram constituídas de CAP 50/70, agregados graníticos e dosadas conforme o método Superpave. Vale ressaltar que as misturas analisadas por Alencar (2009) e Rodrigues (2010) eram constituídas de CAP modificado com polímero e LCC.

Determinou-se, para cada uma das misturas analisadas, a faixa de variação de MR/RT para as amostras condicionadas e não condicionadas. Selecionou-se o cada valor de MR e dividiu-se para cada valor de RT obtendo-se novos valores de MR/RT. Esse cálculo também foi feito utilizando os valores seguintes de MR totalizando 25 valores de MR/RT. Através desse procedimento obteve-se a faixa de variação selecionando-se os valores mínimo e máximo de cada MR/RT calculado. A Tabela 4.17 mostra os resultados das faixas de variação para as misturas analisadas. A representação esquemática do procedimento utilizado para a realização dos cálculos para as amostras condicionadas e não condicionadas é mostrada na Figura 4.26.

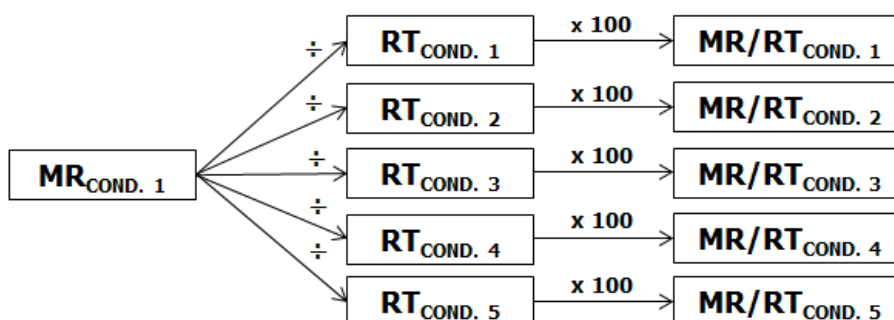


Figura 4.26 – Representação esquemática para o cálculo da faixa de variação de MR/RT

Tabela 4.17 – Resultados das faixas de variação de MR/RT

Mistura	Teor de CAP (%)	MR/RT		Faixa de Variação de MR/RT	
		Cond.	Não Cond.	Cond.	Não Cond.
CAP convencional	6,0	4.319	4.313	3.396 - 6.039	3.190 - 5.244
CAP + 2% LCC	6,0	4.507	4.767	3.805 - 5.972	3.760 - 6.001
CAP + 2% Cal	5,5	6.505	6.205	5.442 - 6.839	5.946 - 7.119

Nota-se que, de maneira geral, houve maior variação de MR/RT para as amostras condicionadas se comparadas às amostras não condicionadas. A mistura com 2% de cal como filer apresentou menor variação de MR/RT para as amostras condicionadas (1.397) e não condicionadas (1.173). Entretanto, a mistura com CAP + 2% LCC apresentou pequena variação entre as amostras condicionadas (2.167) e não



condicionadas (2.241). Vale salientar que, o parâmetro MR/RT é uma relação empírica utilizada entre amostras produzidas em laboratório e amostras retiradas de campo e, principalmente, e foi pensado devido ao fato de que algumas universidades não possuíam o equipamento para a realização do ensaio de MR (Vale *et al.*, 2006; Lopes *et al.*, 2008).

#### 4.3.5. Desgaste Cântabro

O ensaio de Desgaste Cântabro foi realizado conforme o procedimento descrito segundo a DNER-ME 383 (1999). As misturas asfálticas analisadas neste ensaio foram dosadas de acordo com o método Superpave com  $V_v = 4\%$ . Dez CPs divididos em dois grupos (condicionado e não condicionado) foram avaliados. Para a terceira mistura, utilizou-se 2% de cal como fíler artificial em substituição ao pó de pedra. Os CPs foram submetidos a 300 revoluções no tambor da máquina de abrasão *Los Angeles* (sem asferas de aço) a uma velocidade de 33 rpm. Os valores de desgaste Cântabro para as misturas analisadas são mostrados na Tabela 4.18 e melhor visualizados na Figura 4.27.

Tabela 4.18 – Resultados do ensaio de desgaste Cântabro

Mistura	Teor de CAP (%)	Grupo condicionado			Grupo não condicionado		
		Média Desgaste (%)	Desvio Padrão (%)	CV (%)	Média Desgaste (%)	Desvio Padrão (%)	CV (%)
CAP convencional	6,0	16	6	36	3	1	27
CAP + 2% LCC	6,0	25	3	11	4	2	59
CAP + 2% Cal	5,5	10	2	20	4	1	46

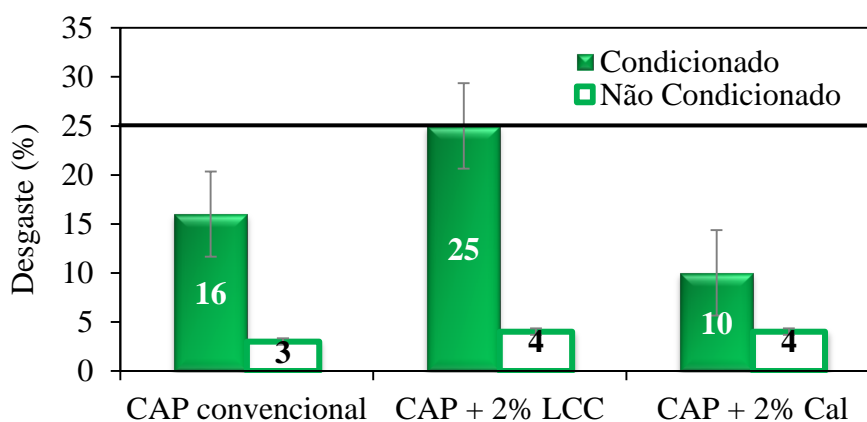


Figura 4.27 – Desgaste médio avaliado através do ensaio Cântabro para as misturas asfálticas

Verifica-se que, a mistura contendo CAP + 2% LCC apresentou maior desgaste se comparada às outras misturas. Devido à dificuldade técnica na época, o ensaio para essa mistura foi realizado com atraso de quatro dias. Como já era esperado, houve maior desgaste para as amostras condicionadas se comparadas às amostras não condicionadas. As amostras não condicionadas apresentaram praticamente o mesmo valor de desgaste, onde a mistura com cal obteve desgaste 1% superior se comparado à mistura contendo CAP convencional. O mesmo comportamento foi verificado por Freitas (2010) ao ensaiar misturas asfálticas contendo CAP convencional e misturas com 2% de gesso como fíler. Freitas (2010) constatou que a mistura com gesso apresentou desgaste de 6% se comparada a mistura contendo CAP convencional que apresentou desgaste de 5%. Os resultados encontrados nesta pesquisa ficaram aquém do desgaste de 2% obtido por Moreira (2009) que analisou misturas asfálticas convencionais não condicionadas constituídas de CAP 50/70 com teor de CAP de projeto de 6,3%, agregados minerais (seixo e brita) e cimento Portland como fíler. Entretanto, vale ressaltar que Moreira (2009) e Freitas (2010) realizaram o ensaio de desgaste Cântabro com amostragem de três CPs e Coeficiente de Variação (CV) de 11,8 e 11,6%, respectivamente.

Verifica-se que, os resultados obtidos nesta pesquisa, foram satisfatórios se comparado aos resultados obtidos por Bock (2009) que analisou misturas asfálticas não condicionadas e condicionadas: com cal em forma de calda, com cal sob a forma seca adicionada ao agregado graúdo e uma mistura contendo CAP convencional 50/70. Bock (2009) verificou que as misturas não condicionadas apresentaram desgaste de 6% para a mistura contendo CAP convencional, 8 e 11% para as misturas com cales em forma de calda e sob a forma seca, respectivamente. As amostras condicionadas avaliadas por Bock (2009) apresentaram desgaste de 18% para a mistura contendo CAP convencional, 24 e 28% para as misturas com cales em forma de calda e sob a forma seca, respectivamente. Vale salientar que, durante o condicionamento aplicado por Bock (2009), os CPs foram mantidos à -18°C não se aplicando o ciclo de aquecimento de 60°C por um período de 24hrs, conforme o procedimento descrito na AASHTO T 283/99. A amostragem utilizada foi de 12 CPs dosados segundo o método Marshall. Os agregados utilizados por Bock (2009) eram de natureza basáltica e as cales foram utilizadas como fíler substituindo em 1% o pó de pedra.

Observou-se que, as misturas analisadas apresentaram valores elevados de CV principalmente para as amostras não condicionadas. O mesmo foi verificado por Budny (2009) ao analisar os seguintes materiais: CAP 50/70 convencional, cal calcítica CH tipo I, cal dolomítica CH tipo I e cal dolomítica CH tipo II. As misturas avaliadas por Budny (2009) apresentaram os seguintes valores de CV: CAP 50/70 convencional (67%), cal calcítica CH tipo I (50%), cal dolomítica CH tipo I (81%) e cal dolomítica CH tipo II (30%). Os valores reportados foram portanto bem superiores aos encontrados nesta pesquisa. A cal dolomítica é a cal com baixo teor de CaO (<65%) e as cales calcíticas CH Tipo I e II são cales ricas em CaO (>88 e >90%, respectivamente). Vale salientar que Budny (2009) utilizou uma amostragem de quatro CPs, agregados de natureza basáltica e as cales foram utilizadas como filler substituindo em 1% o pó de pedra.

É interessante notar que os resultados obtidos nesta pesquisa podem ser considerados satisfatórios se comparados aos resultados obtidos por Bock (2009) e Budny (2009), sobretudo porque estes autores utilizaram misturas com agregados basálticos em comparação aos agregados graníticos utilizados nesta pesquisa. Segundo Ribeiro *et al.* (2011), agregados de natureza basáltica são classificados como básicos e tendem a apresentar maior interação com o CAP, enquanto agregados graníticos são ácidos e costumam apresentar problemas de adesividade (Liberatori e Constantino, 2006; Bernucci *et al.*, 2007).

Estes resultados também indicam que, as amostras referentes aos dois grupos de todas as misturas são consideradas aceitáveis tendo em vista que, as misturas asfálticas apresentam como limite de aceitação estabelecido pelo DNER-ME 383 (1999), um valor inferior a 25% de desgaste. Vale salientar que este limite é válido para misturas asfálticas drenantes. Este limite de aceitação não deve ser considerado aceitável para misturas asfálticas densas por tratar-se de um valor muito elevado. Entretanto, ainda não há um limite de aceitação de referência para considerar como satisfatórias misturas do tipo CA (Moura, 2001; Moizinho, 2007; Bock, 2009; Budny, 2009; Moreira, 2009; Granich, 2010; Freitas, 2010).

#### **4.3.6. Comentários Finais**

Nesse item são resumidamente expostas, as principais observações levantadas a partir dos resultados obtidos neste estudo. Inicialmente foram analisados quatro teores de LCC (0,5%, 1,0%, 1,5% e 2,0%) e constatou-se que apenas o teor de 2,0% proporcionou uma diminuição da viscosidade e das TUCs em relação aos outros teores analisados. A diminuição desses dois parâmetros pode trazer certas vantagens tais como: a redução de custos com energia além da redução da emissão de componentes voláteis que são lançados na atmosfera. Nos ensaios de TG, DSC, IV e PG, verificou-se que a amostra de CAP + 2% LCC apresentou o mesmo desempenho se comparada à amostra de CAP convencional. No entanto, através das curvas mestras, constatou-se que em temperaturas elevadas, houve uma reação de oligomerização com o LCC caracterizada pela quebra das ligações duplas presentes na cadeia alifática.

A caracterização dos agregados através do *AIMS*, do PDI e da caracterização química apresentaram maiores informações sobre as características físico-químicas e mineralógicas dos mesmos em relação aos ensaios de caracterização de agregados tradicionais empregados pelo DNIT. Através dos ensaios de caracterização das misturas asfálticas, verificou-se que, a mistura contendo CAP + 2% LCC apresentou melhor desempenho em relação às outras misturas analisadas de acordo com os critérios mínimos de aceitação adotados neste estudo. Entretanto vale salientar que, estes critérios adotados foram considerados severos e de pouca representatividade considerando-se o clima tropical predominante no Ceará.

## CAPÍTULO 5

### CONCLUSÕES E SUGESTÕES

Esta pesquisa apresentou uma avaliação do potencial do LCC como modificador de CAP com relação à resistência ao dano por umidade induzida e como promotor de adesividade em misturas asfálticas. A partir dos resultados encontrados nesta pesquisa, pode-se concluir que o LCC mostrou-se promissor como aditivo em CAP tendo em vista que, o mesmo influenciou reduzindo os valores relativos à viscosidade do CAP. Isto pode trazer certas vantagens com relação a redução dos gastos relativos à energia e a redução da emissão de voláteis na atmosfera.

Os espectros de infravermelho do LCC indicaram a presença dos grupamentos aromáticos o que é positivo tendo em vista que, alguns aditivos, quando incorporados à mistura asfáltica, apresentam separação de fases devido o próprio CAP retirar a fração aromática presente nestes. O LCC é um composto rico em aromáticos sendo promissor a ponto de aumentar a compatibilidade com o CAP e assim garantir boa estabilidade coloidal. Não foi verificada mudanças significativas no PG da amostra de CAP + 2% LCC se comparada à amostra de CAPCAP convencional sendo tais amostras classificadas como PG 70-28. Vale ressaltar que, isto se deve ao petróleo de origem do CAP utilizado neste estudo.

Através de curvas mestras constatou-se que, para as amostras de CAP + 2% LCC não envelhecidas houve aumento da rigidez até temperaturas intermediárias e sobreposição de curvas à baixas temperaturas se comparada às amostras não envelhecidas de CAP convencional. Após envelhecimento, observou-se a sobreposição de curvas na maior parte do espectro avaliado, havendo pequenas diferenças à baixas temperaturas para a amostra de CAP + 2% LCC em relação à amostra de CAP convencional. No ensaio de TG, constatou-se o mesmo comportamento térmico para as amostras de CAP + 2% LCC e CAP convencional. Até aproximadamente 210°C, as amostras permanecem estáveis não tendo sido detectada nenhuma perda de massa por volatilização seja em atmosfera oxidativa ou em atmosfera inerte.

O ensaio de fluorescência de Raio-X comprovou o caráter ácido dos agregados utilizados nesta pesquisa devido ao teor elevado de silício (61%). Através da utilização do *AIMS* constatou-se que, os agregados foram classificados como sub arredondados,

com baixa esfericidade e com textura lisa. A análise das imagens através do PDI mostraram que a mistura com CAP + 2% LCC apresentou maior grau de cobertura e menor deslocamento da película de CAP se comparada às outras misturas.

No que se refere ao ensaio *Lottman* modificado, constatou-se que a mistura com CAP convencional dosada com  $V_v=7\%$ , foi a única mistura considerada não aceitável considerando o critério de aceitabilidade acima de 80%. Entretanto, a mistura com CAP convencional submetida ao ciclo de resfriamento com temperatura de  $10^\circ\text{C}$ , a mistura com CAP + 2% LCC e a mistura com 2% de cal como fíler, foram consideradas aceitáveis por apresentarem RRTs superiores a 80%. A mistura com CAP + 2% LCC apresentou maior valor de RRT em relação às outras misturas analisadas. Esse fato pode ter sido ocasionado pelas propriedades surfactantes desse aditivo o que pode proporcionar maior compatibilidade química entre CAP modificado e agregados. Os valores de RRT superiores a 100% encontrados nesta pesquisa, possivelmente estão associados à própria variabilidade do ensaio *Lottman* modificado.

No ensaio de MR, verificou-se que as três misturas apresentaram RMR acima de 70% (critério de aceitabilidade) considerado, sendo consideradas aceitáveis. A mistura com CAP + 2% LCC apresentou RMR 35,3% superior se comparada à mistura contendo CAP convencional e RMR 12,2% superior à mistura com 2% de cal como fíler. A faixa de variação de RMR calculada para as misturas mostrou que a mistura contendo CAP convencional foi a mistura com maior variação de RMR (47,1%), enquanto que mistura com CAP modificado com LCC e a mistura com cal como fíler, apresentaram variação de RMR de 25% e 24,8%, respectivamente. Os valores de RMR acima de 100% encontrados nesta pesquisa, referem-se a variabilidade dos CPs e ao fato deste ensaio ter sido realizado para baixos níveis de tensões e, possivelmente, este parâmetro não ter sido deteriorado com a presença da água.

Com relação ao parâmetro MR/RT verificou-se que dentre as misturas condicionadas, a mistura contendo CAP convencional apresentou o menor MR/RT se comparada às outras misturas. Entretanto, dentre as misturas não condicionadas, a mistura com CAP + 2% LCC apresentou menor valor de MR/RT em relação às outras misturas.

Com relação aos resultados do ensaio de desgaste Cântabro, constatou-se que todas as misturas apresentaram praticamente a mesma perda de massa para as amostras não

condicionadas. Dentre as amostras não condicionadas, a mistura com CAP + 2% LCC apresentou maior perda de massa em relação às outras misturas. No entanto, ambas as misturas asfálticas são consideradas aceitáveis por apresentarem valores de desgaste Cântabro inferior a 25%, conforme descrito no DNER-ME 383/99. Vale salientar que, este critério de aceitação é válido apenas para misturas drenantes não havendo ainda critério de aceitação definido para misturas asfálticas densas.

Essa pesquisa mostrou que o CAP modificado com o LCC apresentou praticamente o mesmo comportamento químico se comparado à amostra de CAP convencional. Contudo, foi observado que este aditivo reduziu as TUCs e a viscosidade do CAP convencional. Isso pode representar uma vantagem da utilização do LCC como aditivo do ponto de vista econômico e ambiental. Esses dados mostram que a adição do LCC à mistura asfáltica pode vir a reduzir gastos com energia durante a usinagem, redução na emissão de voláteis na atmosfera e da oxidação excessiva do CAP.

Os resultados mecânicos mostraram que a mistura com CAP + 2% LCC apresentou melhor desempenho se comparada à mistura contendo CAP convencional. A mistura com CAP + 2% LCC apresentou resultados satisfatórios se comparada à mistura com 2% de cal sendo este o aditivo mais utilizado para prevenção do dano por umidade em misturas asfálticas. A vantagem desse aditivo é o fato do mesmo ser natural e abundante no estado do Ceará em relação à outros aditivos sintéticos e de custos consideráveis. Portanto, espera-se que o aditivo LCC venha a ser utilizado em misturas asfálticas com o objetivo de melhorar a afinidade entre CAP e agregados proporcionando melhor adesão e coesão, provendo maior resistência à desagregação e gerando misturas asfálticas menos suscetíveis à ação deletéria da água.

### ***5.1. Sugestões para Trabalhos Futuros***

- Analisar termicamente amostras de CAP convencional e CAP + 2% LCC com auxílio da TG em taxas de aquecimento acima de 10°C;
- Avaliar mecanicamente misturas asfálticas com CAP modificado com LCC condicionadas e não condicionadas através dos ensaios de vida de fadiga, *creep* dinâmico, módulo dinâmico e avaliação da deformação permanente com uso de algum simulador de tráfego de laboratório;

- Avaliar o potencial do LCC como retardante do envelhecimento para misturas asfálticas;
- Avaliar a energia de superfície de CAP modificado com LCC e de agregados;
- Selecionar a granulometria dos agregados através do método de Bailey e verificar outros tipos e combinações de agregados de outras naturezas;
- Comparar o desempenho da mistura com CAP modificado com LCC com uma mistura confeccionada com a adição de um melhorador de adesividade comercial (DOPE);
- Avaliar diferentes métodos de adição de cal em misturas asfálticas e o impacto dos mesmos nas propriedades mecânicas principalmente aquelas relacionadas à resistência ao dano por umidade induzida.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alencar, A. E. V.; Nascimento, D. R.; Soares, J. B.; Soares, S. de A.; Araújo Jr., P. C. A. (2008) Efeito da Adição do Líquido da Casca da Castanha de Caju (LCC) nas Propriedades de Ligantes Asfálticos Modificados com EVA. 39ª Reunião Anual de Pavimentação (RAPv) /13º Encontro Nacional de Conservação Rodoviária (ENACOR), Recife-PE.
- Alencar, A. E. V. (2009) Avaliação do Uso do Polímero EVA, Resíduo da Indústria de Calçados (EVAR) e Aditivos no Desempenho Reológico de Ligante Asfáltico de Petróleo. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Ceará (UFC), Fortaleza, CE.
- Al Rousan, T.M. (2004) Characterization of Aggregate Shape Properties Using a Computer Automated System. Tese de Doutorado. Texas A&M University, College Station, Texas.
- Antunes, F. F. L.; Castelo Branco, V. T. F.; Soares, J. B. (2010) Avaliação dos Impactos Ambientais Causados pela Utilização de Rejeitos em Misturas Asfálticas. Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás – IBP, 20º Encontro de Asfalto.
- Arambula, E. M. (2007) Influence of Fundamental Material Properties and Air voids Structure on Moisture Damage of Asphalt Mixes, Tese de Doutorado. Texas A&M University, College Station, Texas.
- Aragão, F. T. S.; Lutif, J. E. S.; Kim, Y. R.; Soares, J. B. (2007) Avaliação da Zona de Restrição Como Critério Limitador em Misturas Asfálticas Utilizadas em Vias de Baixo Volume de Tráfego. *In: XXI Congresso de Ensino e Pesquisa em Transportes (ANPET)*, Rio de Janeiro, RJ.
- Araújo, M. F. A. S. (2007) Efeito da Radiação Solar no Envelhecimento do Concreto Betuminoso Usinado à Quente. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Ouro Preto, Belo Horizonte, MG.
- AASHTO T 283 (1989) Resistance of Compacted Bituminous Mixture to Moisture Induced Damage. *In: American Association of State Highway and Transportation Officials.*
- AASHTO T 283 (1999) Standard Method of Test Resistance of Compacted Bituminous Mixture to Moisture Induced Damage, Washington, D.C. American Association of State Highway and Transportation Officials.
- AASHTO T 324 (2004) Standard Method of Test for Hamburg Wheel-Track Testing of compacted Hot-Mix Asphalt (HMA). American Association of State Highway and Transportation Officials.
- AASHTO TP5 (2004) Método de Teste Padrão para Determinação das Propriedades Reológicas de Ligante Asfáltico Utilizando um Reômetro de Cisalhamento Dinâmico (DSR). American Association of State Highway and Transportation Officials.
- ASTM D2493 (2001). Standard Viscosity-Temperature Chart of Asphalts. American Society for Testing and Materials.
- ASTM D2872 (2004) Standard Test Method for Effect of Heat and Air on a Moving Film of Asphalt (Rolling Thin-Film Oven Test). American Society for Testing and Materials.
- ASTM D4402 (2002) Standard Test Method for Viscosity Determinations of Unfilled Asphalts Using Brookfield Thermosel Apparatus. American Society for Testing and Materials.
- ASTM D4867 (1996) Effect of Moisture on Asphalt Concrete Paving Mixtures, American Society for Testing and Materials.
- ASTM D6373 (1999) Standard Specification for Performance Graded Asphalt Binder. American Society for Testing and Materials.
- ASTM D6648 (2001) Determining the Flexural Creep Stiffness of Asphalt Binder Using the Bending Beam Rheometer (BBR). American Society for Testing and Materials.
- Azevedo, A. M. (2007) Considerações Sobre a Drenagem Subsuperficial na Vida Útil de Pavimentos Rodoviários. Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (USP), São Paulo, SP.
- Barra, B. S. (2009) Avaliação da Ação da Água no Módulo Complexo e na Fadiga de Misturas Asfálticas Densas. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Florianópolis, SC.
- Bechara, M. F.; Faxina, A. L.; Fabbri, G. T. P.; Soares, J. B.; Soares, S. A. (2008) Avaliação dos Efeitos dos Envelhecimentos a Curto e Longo Prazos por Meio de Curvas Mestres. Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás – IBP, 19º Encontro de Asfalto, Rio de Janeiro, RJ.
- Bernal C.; Couto, A. B.; Breviglieri, S. T.; Cavalheiro, E. T. G. (2002) Influência de Alguns Parâmetros Experimentais nos Resultados de Análises Calorimétricas Diferenciais (DSC). *Revista Química Nova*, n. 25, v. 25, 849-855.
- Bernucci, L. B.; Motta, L. M. G.; Ceratti, J. A. P.; Soares, J. B. (2007) Pavimentação Asfáltica: Formação Básica para Engenheiros. Petrobras: Abeda, Rio de Janeiro, RJ.
- Bhasin, A. (2006) Development of Methods to Quantify Bitumen-Aggregate Adhesion and Loss of Adhesion Due to Water. Tese de Doutorado, Texas A&M University, College Station, Texas.

- Bock, A. L. (2009) Desempenho à Fadiga de Misturas em Concreto Asfáltico com Diferentes Formas de Incorporação de Cal. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande de Sul (UNIJUI), Ijuí, RS.
- Bringel, R. M. (2007) Estudo Químico e Reológico de Ligantes Asfálticos Modificados por Polímeros e Aditivos. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Ceará (UFC), Fortaleza, CE.
- Budny, J. (2009) Avaliação dos Efeitos de Diferentes Tipos de Cal em Misturas de Concreto Asfáltico. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande de Sul (UNIJUI), Ijuí, RS.
- Bhunia, H. P., Nando, G. B.; Basak, A.; Lenka, S.; Nayak, P. L. (1999) Synthesis and Characterization of Polymers from Cashew Nut Shell Liquid (CNSL), a Renewable Resource III. Synthesis of a polyether. *European Polymer Journal*, v. 35, 1713-1722.
- Canevarolo, S. V. (2003) Técnicas de Caracterização de Polímeros. 1ª edição, São Paulo, SP: Editora ARTLIBER, v. 1.
- Caro, S.; Masad, E.; Airey, G.; Bhasin, A.; Little, D. (2008a) Probabilistic Analysis of Fracture in Asphalt Mixtures Caused by Moisture Damage. 87º Encontro Anual de Pesquisa em Transportes (TRB), Washington, DC.
- Caro, S.; Masad, E.; Bhasin, A.; Little, D. N. (2008b) Moisture Susceptibility of Asphalt Mixtures, Part 1: Mechanisms, *Jornal Internacional de Engenharia de Pavimentação*, 81-98.
- Caro, S. (2009) A Coupled Micromechanical Model of Moisture-Induced Damage in Asphalt Mixtures: Formulation and Applications, Tese de Doutorado, Texas A&M University, College Station, Texas.
- Caro, S.; Masad, E.; Bhasin, A.; Little, D. (2010) Micromechanical Modeling of the Influence of Material Properties on Moisture-Induced Damage in Asphalt Mixtures. *Construction and Building Materials*, v.24, 1184-1192.
- Castelblanco, A.; Masad, E.; Birgisson, B. (2005) HMA Moisture Damage as a Function of Air Void Size Distribution, Pore Pressure and Bond Energy. 84º Encontro Anual de Pesquisa em Transportes (TRB), Washington, DC.
- Chompoorat, T.; Likitlersuang, S. (2009) Temperature Shift Function of Asphaltic Concrete for Pavement Design in Tropical Countries. *The IES Journal Part A: Civil & Structural Engineering*, n. 3, v.2, 246-254.
- CNT (2011) Pesquisa CNT de Rodovias: Relatório Gerencial – Brasília: CNT: SEST: SENAT, 328p.
- Dantas, M. S. G. (2000) Obtenção de Antioxidante a partir de Derivados do LCC. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), Natal, RN.
- De Senço, W. (1997) Manual de Técnicas de Pavimentação, V.1, Ed. PINI, 746p.
- DNER-ME 35 (1998) Departamento Nacional de Estradas de Rodagem – Agregados – Determinação da Abrasão “Los Angeles”.
- DNER-ME 78 (1994) Departamento Nacional de Estradas de Rodagem – Adesividade de Agregado Graúdo a Ligante Betuminoso.
- DNER-ME 79 (1994) Departamento Nacional de Estradas de Rodagem – Agregado – Adesividade a Ligante Betuminoso.
- DNER-ME 81 (1998) Departamento Nacional de Estradas de Rodagem – Agregados – Determinação da Absorção e da Densidade de Agregado Graúdo.
- DNER-ME 83 (1998) Departamento Nacional de Estradas de Rodagem – Agregados – Análise Granulométrica.
- DNER-ME 84 (1995) Departamento Nacional de Estradas de Rodagem – Agregado Miúdo – Determinação da Densidade Real.
- DNER-ME 86 (1994) Departamento Nacional de Estradas de Rodagem – Agregado – Determinação do Índice de Forma.
- DNER-ME 138 (1994) Misturas Betuminosas – Determinação da Resistência à Tração por Compressão Diametral.
- DNER (1996) Manual de Pavimentação. 2ª edição. Rio de Janeiro, RJ.
- DNER-ME 383 (1999) Desgaste por Abrasão de Misturas Betuminosas com Asfalto Polímero - Ensaio Cântabro. Rio de Janeiro, DNER.
- DNIT (2006) Manual de Pavimentação. 3ª edição. Rio de Janeiro, RJ.
- DNIT (2009) disponível em: <https://gestao.dnit.gov.br/plano-nacional-de-viacao/pnv-2009-relacao-de-trechos-xls/pnv-2009.pdf>. Acessado em: 15/10/10
- DNIT (2010) disponível em: <https://gestao.dnit.gov.br/plano-nacional-de-viacao/pnv-2010-relacao-de-trechos-xls/pnv-2010.pdf>. Acessado em: 27/02/11.
- DNIT-ES 031 (2006) Pavimentos Flexíveis – Concreto Asfáltico – Especificação de Serviço. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Rio de Janeiro, RJ.

- DNIT-ME 135 (2010) Misturas asfálticas – Determinação da Rigidez por Compressão Diametral sob Carga Repetida.
- Faxina, A. L.; Fabbri, G. T. P.; Soares, J. B. (2009) Efeito da Adição de Ácido Polifosfórico sobre o Comportamento Reológico de um CAP 50/70. IV Simpósio Internacional de Avaliação de Pavimentos e Projetos de Reforço (IV SINAPPRE), Fortaleza, CE.
- Fernandes, P. R. N. (2007) Caracterização de Ligante Asfáltico Brasileiro e Avaliação da Presença de Hidrocarbonetos Policíclicos Aromáticos (HPAs). Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE.
- Fernandes, P. R. N.; Alencar, A. E. V.; Soares, J. B.; Soares, S, A. (2009) Avaliação do Comportamento Térmico e Reológico de Ligante Asfáltico Modificado com Ácido Polifosfórico. 32ª Reunião Anual da Sociedade Brasileira de Química-SBQ, Fortaleza, CE.
- França, F. C. F. (2007) Síntese e Caracterização de Novos Glicosídeos a partir da Amilose e Constituintes do LCC Natural. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE.
- Freitas, R. D. (2010) Efeitos da Adição de Resíduos de Gesso da Indústria da Construção nas Propriedades Mecânicas do Concreto Asfáltico Usinado à Quente. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), Campina Grande, PB.
- Frota, C. A.; Melo, D. M.; Nunes, F. R. G. (2006) Análise do Comportamento Mecânico de Misturas Asfálticas com Resíduo Processado da Construção Civil. *In: V Jornadas Luso-Brasileiras de Pavimentos: Políticas e Tecnologias*, Recife, PE.
- Furlan, A. P. (2006) Considerações Acerca da Adesão e da Suscetibilidade à Umidade de Misturas Asfálticas Densas À Luz de Algumas Propriedades Mecânicas. Tese de Doutorado, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo (USP), São Paulo, SP.
- Furlan, A. P.; Gouveia, L. T.; Fabbri, G. T. P.; Fernandes Jr., J. L. (2004) Influência de Características dos Agregados na Suscetibilidade a Dano por Umidade de Misturas Asfálticas. Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás – IBP, 17º Encontro de Asfalto.
- Furlan, A. P.; Iwanaga, F. I.; Gigante, A. C.; Fabbri, G. T. P. (2007) Influência do Modo de Preparo e do Tipo de Fíler nas Propriedades das Misturas Asfálticas Densas. *In: XXI Congresso Brasileiro de Pesquisa e Ensino em Transportes (ANPET)*, Rio de Janeiro, RJ.
- Furlan, A. P.; Fabbri, G. T. P.; Gigante, A. C.; Bernucci, L. L. B. (2008) Considerações sobre a Suscetibilidade à Umidade de Misturas Asfálticas Densas. 39ª Reunião Anual de Pavimentação, Recife, PE.
- Grande, W. R.; Furlan, A. P.; Gigante, A. C.; Klinsky, L. M.; Fabbri, G. T. P. (2009) Efeitos da Cal Hidratada e do Ácido Polifosfórico na Suscetibilidade Térmica de Misturas Asfálticas Densas. *In: Anais do Panorama Nacional da Pesquisa em Transportes*, Vitória, ES.
- Granich, A. R. (2010) Análise do Desempenho de Misturas Asfálticas com Adição de Cal: Um Estudo de Caso. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande de Sul (UNIJUI), Ijuí, RS.
- Gouveia, L. T.; Furlan, A. P.; Parreira, A. B.; Fernandes Jr., J. L.; Fabbri, G. T. P. (2004) Considerações Acerca da Absorção de Asfalto pelos Agregados e sua Influência na Suscetibilidade à Umidade. *In: XVIII Congresso de Ensino e Pesquisa em Transportes (ANPET)*, Florianópolis, SC.
- Gorkem, C.; Sengoz, B. (2009) Predicting Stripping and Moisture Damage of Asphalt Concrete Prepared with Polymer Modified Bitumen and Hydrated Lime. *Construction and Building Materials*, v.23, 2227-2236.
- Gudimettela, J.; Myers, L. A.; Paugh, C. (2006) AIMS: The Future in Rapid, Automated Aggregate Shape and Texture Measurement. 51ª Conferência Anual da Associação Técnica de Asfalto do Canadá.
- Hanz, A.; Bahia, H. U.; Kanitpong, K.; Wen, H. (2007) Test Method to Determine Aggregate/Asphalt Adhesion Properties and Potential Moisture Damage. Wisconsin Highway Research Program, Performing Organization Code, University of Wisconsin – Madison.
- Harrison, I. R.; Wang, G.; Hsu, T. C. (1992) A Differential Scanning Calorimetry Study of Asphalt Binders. Strategic Highway Research Program, National Research Council, Washington, D.C.
- Hicks, R. P. (1991) Moisture Damage in Asphalt Concrete. National Cooperative Highway Research Program. Synthesis of Highway Practice 175. Transportation Research Board (TRB), Washington, D. C. USA, 91p.
- Huang, S. C.; Robertson, R. E.; Branthaver, J. F. (2003) Physico-Chemical Characterization of Asphalt-Aggregate Interactions Under the Influence of Freeze-Thaw Cycles. Annual Meeting, Transportation Research Record, Washington, D.C. 2-17.
- IPEA (2010) Rodovias Brasileiras: Gargalos, Investimentos, Concessões e Preocupações com o Futuro. Comunicados do Ipea, nº 52, Série Eixos do Desenvolvimento Brasileiro.

- IPEA (2011) Rodovias Brasileiras: Políticas Públicas, Investimentos, Concessões e Tarifas de Pedágio. Texto para Discussão, vol. 1668, 01-48.
- Johnson, D. R.; Freeman, R. B. (2002) Rehabilitation Techniques for Stripped Asphalt Pavements, Western Transportation Institute, Bozeman, Montana, Report No. FHWA/MT-002-003/8123.
- Kiggundu, B. M.; Roberts, F. L. (1988) Stripping in HMA Mixtures: State-of-the-Art and Critical Review of Test Methods. Auburn University: National Center for Asphalt Technology.
- Kok, B. V.; Yilmaz, M. (2009) The Effects of Using Lime and Styrene-Butadiene-Styrene on Moisture Sensivity Resistance of Hot Mix Asphalt. *Construction and building materials*, v.23, 1999-2006.
- Kringos, N. (2007) Modeling of Combined Physical-Mechanical Moisture Induced Damage in Asphaltic Mixes. Tese de Doutorado, Technische Universiteit Delft, Holanda.
- Kringos, N.; Scarpas, A. (2008) Physical and Mechanical Moisture Susceptibility of Asphaltic Mixtures. *International Journal of Solids and Structures*, v.45, 2671-2685.
- Lamontagne, J.; Dumas, P.; Mouillet, V.; Kister, J. (2001) Comparison by Fourier Transform Infrared (FTIR) Spectroscopy of Different Ageing Techniques: Application to Road Bitumens. *Fuel*, vol. 80, 483-488.
- Larsen, O.R.; Moen, Ø.; Robertus, C.; Koenders, B.G. (2004) WAM Foam Asphalt Production at Lower Operating Temperatures as an Environmental Friendly Alternative to HMA. 3° Eurasphalt & Eurobitume Congress, Vienna, Paper 137.
- Liberatori, L. A.; Constantino, R. S. (2006) Melhoradores de Adesividade para Misturas Asfálticas – Estado da Arte. Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás – IBP, 18° Encontro de Asfalto.
- Lima, A. P. D.; Rodrigues, F. O.; Amoni, B.; Bringel, R. M.; Soares, J. B.; Soares, S. A.; Ricardo, N. M. P. S. (2009) Efeito da Adição de Organovermiculita e Líquido da Castanha de Caju (LCC) na Estabilidade a Estocagem de Cimento Asfáltico de Petróleo Modificado por SBS. *In: X Congresso Brasileiro de Polímeros (CBPOL)*, Foz do Iguaçú, PR.
- Lima, C. S.; Tomé, L. G. A.; Soares, J. B. (2005) Estudo das Propriedades Químicas e Reológicas do Ligante Asfalto - Borracha. *In: 3° Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo e Gás*, Salvador, BA.
- Little, D. N.; Bhasin, A. (2005) Effect of Hydrated Lime and Liquid Antistrip on Stripping of HMA Mixtures, Asphalt Technology Conference, Shreveport, LA.
- Little, D. N.; Epps, J. A.; Sebaaly, P. E. (2006) The Benefits of Hydrated Lime in Hot Mix Asphalt. Report for National Lime Association.
- Lopes, M. M.; Vale, A. C.; Soares, J. B. (2008) Estudo Laboratorial de Misturas Asfálticas SMA 12,5mm Dosadas com Diferentes tipos de Ligantes Asfálticos. *In: XV Congresso Panamericano de Engenharia de Trânsito e Transporte (PANAM)*, Cartagena de Indias, Colombia.
- Lottman, R. P.; Brejcek, S. (1990) Practical Evaluation of Moisture Damage Cutoff Specifications for Asphalt Concrete. Final Report TMW90 Transportation Northwest (TRANSNOW), University of Washington.
- Lucena, M. C. C. (2005) Caracterização Química e Reológica de Cimento Asfáltico à Base de Petróleo Brasileiro. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE.
- Lutif, J. S.; Kim, Y. R.; Soares, J. B. (2008) Influência do Método de Adição de Cal Hidratada em Misturas Asfálticas para Reduzir os Danos devido à Umidade em Pavimentos Asfálticos. *In: XXII Congresso de Ensino e Pesquisa em Transportes (ANPET)*, Fortaleza, CE.
- McCann, M.; Anderson-Sprecher, R.; Thomas, K.; Huang, S. (2005) Comparison of Moisture Damage in Hot Mix HMA Using Ultrasonic Accelerated Moisture Conditioning and Tensile Strength Test Results, 84° Encontro Annual de Pesquisa em Transportes, CD-ROM, Washington, D.C.
- Mazzeto, S. E.; Lomonaco, D. (2009) Óleo da Castanha de Caju: Oportunidades e Desafios no Contexto do Desenvolvimento e Sustentabilidade Industrial. *Revista Química Nova*, nº 3, vol. 32, 732-741.
- Masad, E.; Olcott, D.; White, T.; Tashman, L. (2001) Correlation of Fine Aggregate Imaging Shape Indices with Asphalt Mixture Performance, Transportation Research Record, Journal of the Transportation Research Board (TRB), vol. 1757, 148-156.
- Masad, E.; Kassem, E.; Chowdhury, A. (2009) Application of Imaging Technology to Improve Laboratory and Field Compaction of HMA. Texas Department of Transportation and the Federal Highway Administration.
- Masson, J. F.; Pelletier, L.; Collins, P. (2001) Rapid FTIR Method for Quantification of Styrene-Butadiene Type Copolymers in Bitumen. *Journal of Applied Polymer Science*, vol. 79, 1034-1041.
- Masson, J. F.; Perc, S. B. (2005) Solventless Fingerprinting of Bituminous Materials: A High-Resolution Thermogravimetric Method. *Thermoquímica Acta*, vol. 436, 35-42.
- Medina, J. (1997) Mecânica dos Pavimentos, 1ª ed. Rio de Janeiro, COPPE/UFRJ.
- Menezes, M. S. (2003) Notas de Aula, Fundamentos de Pavimentação. Universidade Federal da Bahia, (UFBA), Salvador, BA.

- Moizinho, J. C. (2007) Caracterização e Uso de Agregados Lateríticos do Distrito Federal e do Estado de Roraima em CBUQ. Tese de Doutorado, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, DF.
- Moreira, L. S. (2009) Avaliação de Mistura Asfáltica Utilizada na Malha Rodoviária Paraense: Estudo de Caso. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade da Amazônia, Belém, PA.
- Mothé, M. G. (2009) Estudo do Comportamento de Ligantes Asfálticos por Reologia e Análise Térmica. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ.
- Moulton, L.K. (1980) Highway Subdrainage Design. Report nº FHWA - TS - 80.224 - Federal Highway Administration.
- Moura, E. (2001) Estudo do Efeito de Aditivos Químicos e da Cal como Melhoradores de Adesividade em Misturas Asfálticas Densas. Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, SP.
- Moura, E. (2010) Estudo de Deformação Permanente em Trilha de Roda de Misturas Asfálticas em Pista e em Laboratório. Tese de Doutorado – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, SP.
- Nadkarni, V. M.; Shenoy A. V.; Mathew, J. (1985) Thermomechanical Behavior of Modified Asphalts. 188º Encontro Nacional da Sociedade Química Americana. Philadelphia, PA, 24, 478-484.
- Nascimento, L.; Leite, L.; Campos, E. F. (2006) Uso da Tomografia Computadorizada e de Imagens Digitais para o Estudo de Misturas Asfálticas. Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás - IBP, 18º Encontro de Asfalto, Rio de Janeiro, RJ.
- Núñez, W. P.; Ceratti, J. A.; Peraça, V.; Tsukuda, R. S. (2007) Produzindo Misturas Asfálticas de Elevado Desempenho com Emprego de Cal Hidratada. 38ª Reunião Anual de Pavimentação /12º Encontro Nacional de Conservação Rodoviária (ENACOR), Manaus, AM.
- Oliveira Filho, C. M. S. (2007) Adesão e Coesão em Misturas Asfálticas (Melhoradores de Adesividade, Ligantes Modificados e Intertravamento). In: XX Congresso de Ensino e Pesquisa em Transportes (ANPET), Brasília, DF.
- Ouyang, C.; Wang, S.; Zhang, Y.; Zhang, Y. (2006) Improving the Aging Resistance of Styrene-Butadiene-Styrene Tri-Block Copolymer Modified Asphalt by Addition of Antioxidants. Polymer Degradation and Stability, vol. 91, 795-804.
- Paolini, T. B. (2010) Princípio de um Espectrômetro de Infravermelho IV. Disponível em: [http://pt.wikipedia.org/wiki/Ficheiro:Aparato\\_de\\_espectroscopia\\_IV\\_versao2.png](http://pt.wikipedia.org/wiki/Ficheiro:Aparato_de_espectroscopia_IV_versao2.png). Acessado em: 23/12/10.
- Pereira, A. C. O. (2003) Influência da Drenagem Subsuperficial no Desempenho de Pavimentos Asfálticos. Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (POLI-USP), São Paulo, SP.
- Pereira, D. (2010) Notas de Aula, Materiais para Infraestrutura de Transportes, Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), Santa Maria/RS. Disponível em: [http://www.ufsm.br/engcivil/Material\\_Didatico/TRP1002\\_Mat\\_para\\_infraestrutura\\_de\\_transp/notas\\_de\\_aula/Poligrafo\\_Mat\\_Infra\\_Estrut\\_Transp.pdf](http://www.ufsm.br/engcivil/Material_Didatico/TRP1002_Mat_para_infraestrutura_de_transp/notas_de_aula/Poligrafo_Mat_Infra_Estrut_Transp.pdf). Acessado em: 23/11/10.
- Petersen, J. C.; Branthaver, J. F.; Robertson, R. E.; Harnsberger, P. M.; Duvall, J. J.; Ensley, E. K. (1993) Effects of Physicochemical Factors on Asphalt Oxidation Kinetics. Transportation Research Record, TRB, vol. 1391, 1-10.
- Pilati, F. (2008) Análise dos Efeitos da Borracha Moída de Pneu e do Resíduo de Óleo de Xisto sobre Algumas Propriedades Mecânicas de Misturas Asfálticas Densas. Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, SP.
- PINE, Instrument Company (2010) Manual de Operações, Modelo AFA2A, versão 2.02.
- Pinto, C. I. (2009) Experimental Evaluation of Moisture Damage in Hot Mix Asphalt Using Different Antistripping Agents. Dissertação de Mestrado, University of Nebraska, Lincoln, Nebraska.
- Pinto, S.; Preussler, E. (2002) Pavimentação Rodoviária – Conceitos Fundamentais sobre Pavimentos Flexíveis, Rio de Janeiro, RJ.
- Rabêlo, A. N. (2006) Contribuição ao Estudo da Imprimação Betuminosa das Bases Rodoviárias do Estado do Ceará. Dissertação de Mestrado, Programa de Mestrado em Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE.
- Ribeiro, E. A.; Ferreira, W. L. G.; Castelo Branco, V. T. F.; Soares, S. A.; Soares, J. B.; Mateos, A. (2011) Avaliação da Resistência ao Dano por Umidade em Misturas Asfálticas por Meio de Métodos Adotados no Brasil e na Espanha. Revista Pavimentação, Ano VI, 19-29.
- Rodrigues, F. H. A. (2006) Ação Antioxidante de Derivados do Líquido da Castanha de Caju (LCC) sobre a Degradação Termooxidativa do Poli (1,4-cis-isopreno). Tese de Doutorado em Química Inorgânica, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE.

- Rodrigues, F. O. (2010) Efeito do Líquido da Castanha do Caju (LCC) nas Propriedades Reológicas do Ligante Asfáltico Modificado por SBS. Dissertação de Mestrado, Programa de Mestrado em Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará (UFC), Fortaleza, CE.
- Rodrigues, F. O.; Alencar, A. E. V.; Costa, F. M. L. L.; Soares, J. B.; Soares, S. A. (2009) Investigação das Propriedades Reológicas de Ligante Asfáltico Modificado por SBS e EVA com Adição de LCC. IV Simpósio Internacional de Avaliação de Pavimentos e Projetos de Reforço, Fortaleza, CE.
- Rohde, L. (2007) Estudo de Misturas Asfálticas de Módulo Elevado para Camadas Estruturais de Pavimentos. Tese de doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS.
- Sebally, P. E.; Hitti, E.; Weitzel, D. (2003) Effectiveness of Lime in Asphalt Pavements. 82° Encontro Annual de Pesquisa em Transportes, Washington, DC.
- Shah, B. D. (2003) Evaluation of Moisture Damage Within Asphalt Concrete Mixes. Dissertação de Mestrado, Texas A&M University, College Station, Texas.
- SHRP (1994) The Superpave Mix Design Manual for New Construction and Overlays – SHRP-A407. Strategic Highway Research Program. National Research Council, Washington DC, USA.
- Silva, L.S.; Forte, M. M. C; Specht, L. P.; Ceratti, J. A. (2002) Polímeros como Modificadores Asfálticos. Revista Transportes, v. 10, 84-105.
- Silva, C. E. D. B. D. (2005) Estudo da Permeabilidade de Misturas Asfálticas de Graduação Aberta. Dissertação de Mestrado, Universidade de Campinas (UNICAMP), SP.
- Sindicaju (2011) Exportações de LCC no Comparativo entre os Estados do CE, PI e RN nos Anos de 2009 e 2010. Disponível em: <http://www.sindicaju.org.br/site/exportacao.html>. Acessado em: 03/08/11.
- Solaimanian, M.; Harvey, J.; Tahmoressi, M.; Tandon, V. (2003) Test Methods to Predict Moisture Sensitivity of Hot Mix Asphalt Pavements. Moisture Sensitivity of Asphalt Pavements: a National Seminar. San Diego, California Washington DC: National Academies Press.
- Specht, L. P. (2010) Notas de aula, Conceitos Introdutórios-Rodovias II. Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul-UNIJUI. Disponível em: <http://www2.unijui.edu.br/~specht/rodo2/aula1.pdf>. Acessado em: 23/11/10.
- Tarrer, A. R.; Wagh, V. (1991) The Effect of the Physical and Chemical Characteristics of the Aggregate on Bonding. SHRP, National Research Council, Washington, D.C.
- Tavares, A. R.; Coutinho Neto, B.; Nasser, R. H. (2007) Avaliação de Misturas Asfálticas com Seixo e Brita do Estado do Pará Utilizando o Ensaio de Dano por Umidade Induzida. Traços (UNAMA), v. 9, 83-95.
- Tunnicliff, D. G.; Root, R. E. (1984) NCHRP Report 274: Use of Antistripping Additives in Asphaltic Concrete Mixtures. Laboratory phase. TRB, National Research Council, Washington, D.C.
- Vale, A. C.; Pinto, I. C.; Dantas Neto, S. A.; Soares, J. B. (2006) Estudo Laboratorial da Viabilidade do Uso de Fibras de Coco em Misturas Asfálticas do Tipo SMA. Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás - IBP, 18° Encontro de Asfalto, Rio de Janeiro, RJ.
- Vasconcelos, K. L.; Bhasin, A.; Little, D. N.; Berger, E.; Soares, J. B. (2007) Uso de Cal na Forma de Prills em Misturas Asfálticas Usinadas a Quente. In: XIV Congresso Ibero-Latinoamericano del Asfalto, La Habana, Cuba.
- Vasconcelos, K. L.; Bhasin, A.; Little, D. N.; Soares, J. B. (2008) Medidas de Adesão entre Agregado e Ligante Asfáltico. Revista Transportes, XVI, nº 1, 17-24.
- Vasconcelos, K. L. (2010) Moisture Diffusion in Asphalt Binders and Fine Aggregate Mixtures. Tese de Doutorado. Texas A&M University, College Station, Texas.
- West, R. C.; Watson, D. E.; Turner, P. A.; Casola, J. R. (2010) NCHRP Report 648: Mixing and Compaction Temperatures of Asphalt Binders in Hot-Mix Asphalt. TRB. National Research Council, Washington, D.C.
- Zaniewski, J.; Viswanathan, A. G. (2006) Investigation of Moisture Sensivity of Hot Mix Asphalt Concrete. Asphalt Technology Program, Morgantown, West Virginia University. Disponível em: [http://www2.cemr.wvu.edu/~wwwasph/wvdohreports/moist\\_sen.pdf](http://www2.cemr.wvu.edu/~wwwasph/wvdohreports/moist_sen.pdf). Acessado em: 23/11/10.
- Zegarra, J. R. E. (2007) Avaliação de Misturas Produzidas com Ligantes Asfálticos Peruanos Convencional PEN 60/70 e Modificados por Polímero SBS Tipo I 60/60 e PG 76-22. Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, SP.
- Zollinger, C. J. (2005) Application of Surface Energy Measurement to Evaluate Moisture Susceptibility of Asphalt and Aggregates. Dissertação de Mestrado, Texas A&M University, College Station, Texas.