

UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
PROGRAMA DE MESTRADO EM ENGENHARIA DE TRANSPORTES

ESTUDO LABORATORIAL DA VIABILIDADE DO USO DE FIBRAS
DE COCO EM MISTURAS ASFÁLTICAS DO TIPO SMA

Aline Colares do Vale

Dissertação submetida ao Programa de
Mestrado em Engenharia de Transportes da
Universidade Federal do Ceará, como parte
dos requisitos para a obtenção do título de
Mestre em Ciências (M.Sc.) em Engenharia
de Transportes

ORIENTADOR: Prof. Jorge Barbosa Soares, Ph.D.

Fortaleza

2007

FICHA CATALOGRÁFICA

VALE, ALINE COLARES DO

Estudo Laboratorial da Viabilidade do Uso de Fibras de Coco em Misturas Asfálticas do Tipo SMA. Fortaleza, 2007.

XXII, 125 fl., Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Programa de Mestrado em Engenharia de Transportes, Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2007.

1. Transportes – Dissertação

2. Misturas do Tipo SMA

3. Fibras de Coco

4. Densidade Máxima Teórica

CDD

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

VALE, A.C. (2007). Estudo Laboratorial da Viabilidade do Uso de Fibras de Coco em Misturas Asfálticas do Tipo SMA. Dissertação de Mestrado, Programa de Mestrado em Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE, 125 fl.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Aline Colares do Vale

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO: Estudo Laboratorial da Viabilidade do Uso de Fibras de Coco em Misturas Asfálticas do Tipo SMA.

É concedida à Universidade Federal do Ceará permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

Aline Colares do Vale

Rua D, 400. Itaperi / CEP 60.743- 245 – Fortaleza / CE – Brasil

ESTUDO LABORATORIAL DA VIABILIDADE DO USO DE FIBRAS DE COCO EM
MISTURAS ASFÁLTICAS DO TIPO SMA

Aline Colares do Vale

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. Jorge Barbosa Soares, Ph.D.
(Orientador)

Prof. Silvrano Adonias Dantas Neto, D.Sc.
(Examinador Interno)

Dra. Michéle Dal Toé Casagrande
(Examinador Interno)

Prof. José Afonso Gonçalves de Macedo, D.Sc.
(Examinador Externo)

FORTALEZA, CE – BRASIL
AGOSTO DE 2007

DEDICATÓRIA

Aos meus pais, Valderi e Auricélia, que tanto amo e participantes ativos de todos os processos que norteiam minha existência e dedicação a mim dispensada sem medir esforços e por apenas querer ver o meu sucesso. Não tenho palavras para expressar o quanto os amo e o quanto vocês são importantes na minha vida, DEDICO.

AGRADECIMENTOS

- Primeiramente, ao meu Senhor Deus, por me fazer acreditar sempre em dias melhores. “Ele me faz repousar em pastos verdejantes. Leva-me para junto das águas de descanso; refrigera-me a alma” Salmos 23:2-3.
- Aos meus amados pais, pelo amor e educação, por compartilharem comigo momentos de alegria e me darem força nos momentos de dificuldade. Espero poder contribuir um dia tudo de bom que vocês já me trouxeram.
- Aos meus irmãos, Vinícius e Victor, que tanto amo, pelo companheirismo, pelo riso fácil e pelas palavras de apoio e atitudes de consolo nos momentos mais difíceis.
- Ao meu orientador de muitos anos, prof. Jorge Barbosa Soares, pessoa a qual considero um ícone de competência profissional e um exemplo de conduta irretocável e seriedade com as coisas e pessoas as quais lida no dia-a-dia. Obrigado por me acolher no laboratório, o qual o senhor é uma peça vital, além de ser fundador.
- Ao prof. Silvrano Adonias Dantas Neto, pelo apoio e atenção a mim dispensados. Sempre com um sorriso fácil e palavras de ânimo nos momentos mais delicados, encorajando-me a enfrentar as dificuldades, por mais difíceis que aparentem ser.
- A todos que fazem parte do Laboratório de Mecânica dos Pavimentos da Universidade Federal do Ceará, por compartilharem comigo as dificuldades e ansiedades vividas durante essa trajetória, por vibrarem com minhas conquistas, pela companhia e momentos de descontração. Agradeço em especial à minha AMIGA Michéle Dal Toé Casagrande, que viveu de perto toda essa caminhada e me deu apoio todos os instantes; à Ingrid Capistrano, bolsista de iniciação científica, sem a qual parte desse trabalho não seria possível; aos técnicos de laboratório Rômulo, Cleiton, e André, pelas horas a mais de trabalho despendidas

para a conclusão dessa dissertação; a Annie Karine e Lucimar, pela doçura, gentileza e boa vontade com todos que fazem parte do LMP.

- A todos os professores e funcionários do Departamento de Engenharia de Transportes da UFC, em especial à Ivone, que, num exercício de paciência, nos ajuda durante todo o caminho do mestrado.
- À Petrobras, através dos engenheiros João Augusto Paiva (Lubnor) pelo apoio técnico, palavras de incentivo e injeções de ânimo.
- Ao DNIT, através do engenheiro Valdonel Castelo Branco, que desde o começo apoiou, torceu e participou para uma engenharia rodoviária de melhor qualidade.
- À Agência Nacional do Petróleo, pelo financiamento da bolsa de estudos.
- Aos meus avôs paternos Gerardo Nonato do Vale e Rosita Andrade do Vale, aos meus avôs maternos Antônio Colares Ferreira e Maria Alves Colares.
- Aos meus tios Rejane, Rosângela, Lúcia, Geralda, Maristônia, José Ronilson, pelo constante apoio e incentivo.
- Aos meus primos do coração Lidiane, Isaac, Giselle, Érika, Filipe, Esaú, Priscila, Gabriel, Neto, Amanda e Débora, por fazerem parte da minha vida.
- Aos amigos da turma do 3^o ano do colégio Farias Brito em 1998, Lígia, Weidiany, Matheus e Taís pela grande amizade que se conserva há mais de uma década e que só fortalece a cada dia que passa.
- Aos amigos que também conheci no colégio Farias Brito em outras épocas, Zenon, Isabela, Mairton, Larissa, Fernando, Thiciane, João Bruno, Marcos Paulo, João Luiz, Ravena, João Neto, Augusto, Immanuel, Daniel, Kelly, Sara, Davi (em

memória) e muitos outros que torcem por mim e me incentivam a seguir em frente com o ânimo que me é de costume.

- Aos amigos da faculdade de Engenharia Civil Tereza, Tiago, Marcelo e Vinícius, dentre muitos outros, por fazerem parte dos cinco anos mais maravilhosos da minha vida, os anos de minha graduação acadêmica.
- Aos meus amigos que conheci numa época bastante especial da minha vida Lili, Grazielle, Nadir, Jamile, Ricardo, Carlos Eduardo, Marcos Heleno, Igor e Daniel, por me agüentarem e me incentivarem com a companhia agradável do cotidiano. “Em todo tempo ama o amigo, e na angústia se faz irmão” Provérbios 17:17.
- A todos os outros integrantes da minha família, tios, primos e amigos que fizeram parte da minha vida e contribuíram de alguma forma para as vitórias que obtive até hoje e por sempre acreditarem em mim.

MUITO OBRIGADA POR TUDO!

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.

ESTUDO LABORATORIAL DA VIABILIDADE DO USO DE FIBRAS DE COCO EM MISTURAS ASFÁLTICAS DO TIPO SMA

Aline Colares do Vale

Agosto de 2007

Orientador: Jorge Barbosa Soares

A tecnologia de materiais asfálticos e de misturas evoluiu muito nas últimas três décadas na Europa e na América do Norte. Para a camada de rolamento, em países desenvolvidos vem crescendo a utilização de misturas asfálticas mais resistentes e mais duráveis, sendo que algumas destas soluções envolvem o emprego de gradação descontínua, tal como o SMA (Stone Matrix Asphalt – Matriz Pétreas Asfáltica). O objetivo desta pesquisa é avaliar a viabilidade da incorporação de fibras de coco, devido à abundância deste material na região Nordeste, em misturas asfálticas do tipo SMA, como alternativa em substituição à incorporação das fibras de celulose, através das metodologias Marshall e Superpave. Os procedimentos de dosagem utilizados apresentam como maiores diferenças: (i) determinação da densidade máxima teórica; (ii) metodologia de compactação; e (iii) envelhecimento de curto prazo das misturas. As misturas selecionadas foram todas densas, tendo volume de vazios em torno de 4%, variando-se o teor e os tipos de fibras utilizadas nas misturas asfálticas. A determinação da densidade máxima teórica (DMT) foi realizada através da aplicação do vácuo, pelo método Rice. O envelhecimento de curto prazo foi considerado apenas na dosagem Superpave, onde foi adotado um tempo de 2h das misturas em estufa, na temperatura de compactação. Os resultados dos teores de projeto obtidos, com variação do tipo de fibra, seguindo as metodologias Marshall e Superpave, apresentaram-se semelhantes. A caracterização mecânica das misturas foi realizada através dos ensaios de resistência à tração estática por compressão diametral

(RT), módulo de resiliência (MR), vida de fadiga por compressão diametral a tensão controlada e resistência à tração retida por umidade induzida (RRT). Os resultados encontrados mostram que a fibra de coco atende às exigências. A análise da viabilidade do uso da fibra local é importante para a região Nordeste, devido à valorização do material regional e também por ser economicamente viável quando comparado à fibra de celulose, devido a sua abundância na região.

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

STUDY OF THE VIABILITY OF THE STAPLE FIBRE USE OF COCONUT IN
ASPHALT MIXTURES SMA

Aline Colares do Vale

August of 2007

Advisor: Jorge Barbosa Soares

The technology of asphalt materials and mixtures evolves very in these last three decades in the Europe and the North America. To the rolling layer, it comes growing the use in developed countries of more resistant and more durable asphalt mixtures, being that some of these solutions involve the job of discontinuous gradation, as the SMA (Stone Matrix Asphalt). The main objective of this research presents the evaluation of the potential use of coconut fibers in the mixture SMA with different aggregate gradations using both the Marshall and Superpave (level 1) design method. The differences between these two design methods are: (i) theoretical maximum specific gravity (Gmm) determination; (ii) compaction method and (iii) short-term aging of the mixtures. It was selected to this research dense mixtures with 4% air voids. The Gmm was determined indirectly from the mixture composition and the relative densities of the constituents of the mixes, and through the uses of a vacuum pump (Rice method). Short-term aging was considered just in the Superpave design, with 2 hours in the oven at the compaction temperature. The design results showed the same optimum asphalt content for Marshall and Superpave mixtures. The mechanical behavior of the mixtures was evaluated by: the indirect tensile strength, resilient modulus, fatigue life (stress controlled) and resistance to moisture damage. The results show that the coconut fibers meet current requirements. This analysis of the viability of the use of the local fiber is important for the Northeast region, due to valuation of regional material e, also, for economically viable when being compared with the fiber of cellulose due its abundance in the region.

SUMÁRIO

<i>1 INTRODUÇÃO</i>	1
1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	1
1.2 OBJETIVOS	5
1.2.1 Objetivo Geral	5
1.2.2 Objetivos Específicos	5
1.3 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO	6
<i>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</i>	7
2.1 MISTURAS ASFÁLTICA DO TIPO SMA	7
2.1.1 Breve Histórico	7
2.1.2 Conceito e Princípio de Funcionamento do SMA	12
2.1.3 Características do Desempenho da Mistura Asfáltica SMA	17
2.2 DENSIDADE MÁXIMA TEÓRICA	18
2.2.1 Ponderação das Densidades Reais	19
2.2.2 Método do Querosene	20
2.2.3 ASTM D 2041	23
2.3 FIBRAS DE COCO	25
2.3.1 Proveniência	25
2.3.2 Características dos Coqueiros	26
2.3.3 Solo e Clima	27
2.3.4 Características das Fibras de Coco	28
2.3.5 Vantagens na Utilização das Fibras de Coco	29
2.4 ALTERNATIVAS DE APROVEITAMENTO DO COCO	30
2.4.1 Produção de Coiro	30
2.4.2 Biotecnologia e Agricultura	31
2.4.3 Produção de Papel	33
2.4.4 Engenharia de Alimentos e Zootecnia	34
2.4.4.1 Enriquecimento de Alimentos para a Alimentação Humana	34
2.4.4.1 Complementação Alimentar Animal	35
2.4.5 Engenharia de Civil e de Materiais	36
2.4.5.1 Matrizes Poliméricas	36
2.4.5.2 Isolante Térmico	38
2.4.5.3 Construção Civil	39
2.4.5.4 Produção de Mantas e Telas para Proteção do Solo	41
<i>3 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS E PROCEDIMENTOS DE</i>	42

<i>ENSAIO</i>	
3.1 AGREGADOS	42
3.2 LIGANTES ASFÁLTICOS	50
3.3 FIBRAS	54
3.3.1 Fibras de Celulose	54
3.3.2 Fibras de Coco	56
3.3.2.1 Comportamento Termogravimétrico da Fibra de Coco	57
<i>4 DOSAGEM DAS MISTURAS ASFÁLTICAS</i>	61
4.1 SELEÇÃO DA GRANULOMETRIA	61
4.2 DENSIDADE MÁXIMA TEÓRICA DAS MISTURAS	63
4.3 DETERMINAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS DE ESCORRIMENTO DE MISTURAS ASFÁLTICAS NÃO COMPACTADAS – AASHTO T 305/97	65
4.4 DOSAGEM MARSHALL	68
4.4.1 Misturas SMA	72
4.5 DOSAGEM SUPERPAVE	75
4.5.1 Misturas SMA	79
4.6 COMPARAÇÃO DAS DOSAGENS MARSHALL E SUPERPAVE	80
4.7 ABSORÇÃO DE ASFALTO	82
4.7.1 Métodos de Determinação da Absorção	83
4.7.1.1 Determinação da Taxa de Absorção de Asfalto	84
4.7.1.2 Comportamento da Absorção de Asfalto pelo Agregado Granítico em Relação ao Teor de Asfalto em Diferentes Misturas	84
<i>5 CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA</i>	87
5.1 ENSAIO DE RESITÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMENTAL	87
5.2 MÓDULO DE RESILIÊNCIA	90
5.3 FADIGA POR COMPRESSÃO DIAMENTAL A TENSÃO CONTROLADA	96
5.2 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO RETIDA POR UMIDADE INDUZIDA	104
<i>6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES</i>	111

6.1 CONCLUSÕES	111
6.2 RECOMENDAÇÕES PARA PESQUISAS FUTURAS	113
<i>7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</i>	114

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1: Unidade de beneficiamento de casca de coco do nordeste-Fortaleza/CE (Fonte: ROSA, 2004).	4
Figura 2.1: Composição de mistura asfáltica tipo SMA.	12
Figura 2.2: Comparação entre as curvas granulométricas médias de cada faixa de tipos de misturas SMA, CBUQ e CPA (MOURÃO, 2003).	13
Figura 2.3: (a) SMA aplicado na via Anchieta no estado de São Paulo; (b) CBUQ aplicado na BR-116 no estado de São Paulo e (c) CPA aplicado na rodovia SP 160 Ecovias no estado de São Paulo (Fonte: ARTESP, 2007).	15
Figura 2.4: Diagrama dos componentes – SMA (Fonte: REIS, 2001).	16
Figura 2.5: Ilustração da DMT para misturas asfálticas (Fonte: VASCONCELOS, 2004).	18
Figura 2.6: Ilustração do volume considerado na determinação da densidade real de agregados e ligante asfáltico (Fonte: VASCONCELOS, 2004).	20
Figura 2.7: Ilustração da tampa de borracha com orifício preenchido com vidro de diâmetro reduzido (Fonte: VASCONCELOS, 2004).	22
Figura 2.8: Equipamento pra ensaio de DMT com aplicação de vácuo – LMP/UFC.	23
Figura 2.9: Ilustração dos vazios existentes entre os filmes de ligante (Fonte: VASCONCELOS, 2004).	24
Figura 2.10: (a) Coqueiro Anão e (b) Coqueiro Alto (Fonte: ARAGÃO, 2002).	27
Figura 2.11: Corte longitudinal do coco (Fonte: ROSA, 2002).	28
Figura 3.1: Vista da pedreira Itaitinga.	42
Figura 3.2: Etapas do ensaio de adesividade realizado para a brita $\frac{3}{4}$.	43
Figura 3.3: Etapas do ensaio de densidade de agregado graúdo.	44
Figura 3.4: Paquímetro para determinação da lamelaridade de agregado graúdo.	45
Figura 3.5: Passos para determinação da densidade de agregado miúdo (ASTM C 128-07): (a) material muito seco e (b) deslizamento ótimo da amostra.	46

Figura 3.6: Resumo do procedimento de ensaio de densidade de agregado miúdo segundo ASTM C 128 – 07.	48
Figura 3.7: Algumas etapas do ensaio de angularidade de agregado miúdo, realizado no Laboratório de Mecânica dos Pavimentos/UFC (Fonte: VASCONCELOS, 2004).	49
Figura 3.8: Equipamentos utilizados na determinação do grau de desempenho de ligante: (a) reômetro de cisalhamento dinâmico – DSR e (b) reômetro de flexão em viga – BBR.	53
Figura 3.9: (a) Fibra de celulose sem ligante e (b) impregnada com ligante.	55
Figura 3.10: Fibra de coco.	57
Figura 3.11: Análise termogravimétrica TG/DTG de fibras em ar sintético.	59
Figura 3.12: Análise Termogravimétrica TG/DTG de fibras de coco em atmosfera inerte (N ₂).	59
Figura 4.1: Curva granulométrica.	62
Figura 4.2: Resultados de DMT e DDM obtidos nas dosagens das misturas asfálticas SMA 12,5mm.	64
Figura 4.3: Cesta usada no ensaio de escorrimento de misturas asfálticas não compactadas (AASHTO T 305/97).	66
Figura 4.4: Ensaio de escorrimento realizado nas misturas asfálticas SMA.	68
Figura 4.5: Exemplo de obtenção do teor de projeto.	70
Figura 4.6: Gráfico Viscosidade (Poise) × Temperatura para o CAP 50/70 Fazenda Alegre.	71
Figura 4.7: Passos para compactação Marshall das amostras.	72
Figura 4.8: Teores de projeto obtidos para as misturas asfálticas SMA 12,5mm – Marshall.	74
Figura 4.9: Compactadas giratório LMP/UFC – Troxler 4140.	76
Figura 4.10: Passos para compactação Superpave das amostras.	78
Figura 4.11: Teor de projeto obtido para as misturas asfálticas SMA 12,5mm – Superpave.	79

Figura 4.12: Resumo das dosagens das três misturas asfálticas SMA 12,5mm.	82
Figura 5.1: Prensa metálica utilizada para realização dos ensaios de resistência à tração.	88
Figura 5.2: Resultados dos ensaios de resistência à tração com os respectivos teores de projeto de cada mistura SMA 12,5mm.	90
Figura 5.3: Equipamento de carga repetida LMP/UFC.	93
Figura 5.4: Resultados da razão MR/RT com os respectivos teores de projeto de cada mistura asfáltica SMA 12,5mm.	94
Figura 5.5: Resultados da razão MR/RT com os respectivos teores de projeto de cada mistura asfáltica SMA 12,5mm.	95
Figura 5.6: Equipamento de fadiga por compressão diametral a tensão controlada LMP/UFC.	99
Figura 5.7: Vida de fadiga versus diferença de tensões para as misturas asfálticas SMA 12,5mm dosada pela metodologia Marshall.	100
Figura 5.8: Vida de fadiga versus diferença de tensões para as misturas asfálticas SMA 12,5mm dosada pela metodologia Superpave.	101
Figura 5.9: Vida de fadiga versus diferença de tensões para as misturas asfálticas SMA 12,5mm dosadas pela metodologia Marshall e Superpave.	102
Figura 5.10: CP's serrados da mistura asfáltica: (a) SMA com fibra de coco na metodologia Marshall e (b) SMA com fibra de coco na metodologia Superpave.	104
Figura 5.11: Alguns passos para a determinação da RT e RTu.	107
Figura 5.12: Gráfico para obtenção do número de golpes necessários para Vv entre 6 à 8% (a) mistura SMA sem fibra; (b) mistura SMA com fibra de celulose e (c) mistura SMA com fibra de coco.	108
Figura 5.13: Resultados de RRT para as misturas asfálticas 12,5mm analisadas.	110

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Recomendações finlandesas para adição de fibras em misturas asfálticas tipo SMA em relação ao peso total da mistura ligante – agregado (PANK, 1995).	8
Tabela 2.2: Faixas granulométricas – Alemanha.	10
Tabela 2.3: Composição média dos materiais nas misturas asfálticas.	14
Tabela 2.4: Características químicas da fibra de coco (CARRIJO, 2002).	32
Tabela 3.1: Determinação das densidades e da absorção da brita $\frac{3}{4}$, segundo ASTM C 127 – 88.	44
Tabela 3.2: Determinação das densidades e da absorção do pó de pedra, segundo ASTM C 128 – 07.	48
Tabela 3.3: Características da cal hidratada (Carbomil, S.A).	49
Tabela 3.4: Propriedades convencionais do CAP 50/70 Fazenda Alegre.	50
Tabela 3.5: Composição química do CAP 50/70. Fazenda Alegre, realizadas no Laboratório de Mecânica dos Pavimentos/UFC.	52
Tabela 3.6: Resultados das análises relativas às especificações Superpave do CAP 50/70 Fazenda Alegre realizadas no Laboratório de Mecânica dos Pavimentos/UFC.	53
Tabela 3.7: Características exigidas para as fibras de celulose segundo NCAT (1999) (REIS, 2002).	55
Tabela 3.8: Resultado de testes em amostras da fibra VIATOP.	55
Tabela 3.9: Características e propriedades da fibra de coco (VALE <i>et al.</i> , 2006a).	57
Tabela 4.1: Especificações da AASHTO (MP8 – 01) para granulometria de misturas asfálticas SMA.	62
Tabela 4.2: Granulometria da mistura asfáltica SMA 12,5mm desta pesquisa.	62
Tabela 4.3: Resultados de DMT e DMM obtidos para as dosagens das misturas asfálticas estudadas.	63
Tabela 4.4: Resultado do ensaio de escorrimento (VALE <i>et al.</i> , 2005).	68

Tabela 4.5: Teores de projeto obtidos para as misturas asfálticas SMA.	73
Tabela 4.6: Exigências de alguns parâmetros volumétricos adotadas em países europeus (EAPA, 1998) e nos EUA (NAPA, 2002).	75
Tabela 4.7: Número de giros especificados na norma de dosagem Superpave (BERNUCCI <i>et al.</i> , 2007).	76
Tabela 4.8: Teores de projeto obtidos para as misturas asfáltica SMA 12,5mm – Superpave.	79
Tabela 4.9: Parâmetros volumétricos dos CP's moldados no teor de projeto.	80
Tabela 4.10: Influência de alguns fatores no teor de projeto de misturas asfálticas.	81
Tabela 4.11: Dados de entrada das misturas asfálticas com fibra de celulose, fibra de coco e sem fibra.	85
Tabela 4.12: Resultados da taxa de absorção de asfalto pelos agregados nas diferentes misturas analisadas.	85
Tabela 5.1: Resultados do ensaio de resistência à tração (MPa, 25°C).	90
Tabela 5.2: Resultados do ensaio de módulo de resiliência (MPa, 25°C).	94
Tabela 5.3: Resultados da razão MR/RT.	95
Tabela 5.4: Testes de sensibilidade a umidade para amostras compactadas (Fonte: SOLAIMANIAN <i>et al.</i> , 2004).	105
Tabela 5.5: Número de golpes para obtenção dos vazios exigidos em AASHTO T 283 – Marshall.	107
Tabela 5.6: Número de giros para obtenção dos vazios em AASHTO T 283 – Superpave.	109
Tabela 5.7: Resultados de RT, RTu e RRT para as misturas asfálticas SMA 12,5mm analisadas.	109

LISTA DE SÍMBOLOS

D_a	Densidade Aparente do Corpo de Prova Compactado segundo Norma Americana (ASTM D2726-00)
D_a'	Densidade Aparente do Corpo de Prova Compactado segundo Norma Brasileira (DNER-ME 117/87)
$D_{a\text{SSS}}$	Densidade Aparente em Condição SSS
D_r	Densidade Real
G_{mm}	<i>Theoretical Maximum Specific Gravity</i>
P_{SSS}	Peso da Amostra em Condição Saturada Superfície Seca
RT_u	Resistência a Tração por Compressão Diametral após Condicionamento
δ_r	Deslocamento Elástico ou Resiliente
μ	Coefficiente de Poisson
σ_t	Tensão de Tração
ε_t	Deformação Específica Recuperável

LISTA DE ABREVIATURAS

A	Ângulo de Giro
AASHTO	<i>American Association of State Highway and Transportation Officials</i>
ANP	Agência Nacional do Petróleo
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
BBR	<i>Bending Beam Rheometer</i>
CAP	Cimento Asfáltico de Petróleo
CBUQ	Concreto Betuminoso Usinado a Quente
CNT	Confederação Nacional do Transporte
CP	Corpo de Prova

CPA	Camada Porosa de Atrito
D	Diâmetro do Corpo de Prova
DC	Deformação Controlada
DMM	Densidade Máxima Medida
DMT	Densidade Máxima Teórica
DMTE	Densidade Máxima Teórica no Ensaio
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
DRC	<i>Dry Rodder Unit Weight</i> - Peso Unitário Seco Compactado
DSR	<i>Dynamic Shear Rheometer</i>
DTG	Derivada do Termograma
ESAL	<i>Equivalent Single-Axle Load</i>
F	Carga de Ruptura
F	Carga Vertical Aplicada Diametralmente no Corpo de Prova para Ensaio de Módulo de Resiliência
FHWA	<i>Federal Highway Administration</i>
h	Altura do Corpo de Prova
ICTA	Confederação Internacional de Análise Térmica
LMP	Laboratório de Mecânica dos Pavimentos
LVDT	<i>Linear Variable Differential Transformer</i>
M	Dosagem Marshall
MEM	Massa Específica Máxima
MR	Módulo de Resiliência
N	Vida de Fadiga
N _{inicial}	Número de giros inicial

N_{projeto}	Número de giros de projeto
$N_{\text{máximo}}$	Número de giros máximo
NAPA	<i>National Asphalt Pavement Association</i>
NCAT	<i>National Center for Asphalt Technology</i>
P	Peso
P_r	Pressão Aplicada durante a Compactação por Amassamento
PG	<i>Performance Grade</i> - Grau de Desempenho
RBV	Relação Betume-Vazios
RRT	Resistência a Tração Retida por Umidade Induzida
RT	Resistência a Tração Estática por Compressão Diametral
RTu	Resistência a Tração Estática por Compressão Diametral após condicionamento
RTFOT	<i>Rolling Thin Film Oven Test</i>
S	Dosagem Superpave
s	Rotação do Compactador Giratório
SGC	<i>Superpave Giratory Compactor</i>
SHRP	<i>Strategic Highway Research Program</i>
SMA	<i>Stone Matrix Asphalt</i>
SSS	Saturada Superfície Seca
SST	<i>Superpave Shear Test</i>
Superpave	<i>Superior Performance Asphalt Pavements</i>
TC	Tensão Controlada
TG	Termogravimetria
TMN	Tamanho Máximo Nominal
UNIT	Unidade de Infraestrutura de Transportes

UFC	Universidade Federal do Ceará
VAM	Vazios no Agregado Mineral
VCA	<i>Voids in Coarse Aggregate</i> - Vazios no Agregado Graúdo
VCB	Vazios Cheios com Betume
V _v	Volume de Vazios
VCA _{DRC}	Vazios no Agregado Graúdo - Peso Unitário Seco Compactado
VCA _{MIS}	Vazios no Agregado Graúdo na Mistura

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A evolução do transporte rodoviário, a partir dos anos 50, ocorreu em ritmo extraordinariamente rápido no Brasil. Entre 1945 e 1952, o número de caminhões e ônibus em circulação no país passou de 103 mil para 265 mil, o que representa de mais de 157%, em apenas 7 anos (INSTITUTE OF INTERAMERICAN AFFAIRS, 1954). Na década de 60, a movimentação de cargas foi largamente transferida das ferrovias e da cabotagem para as rodovias. Enquanto em 1946 o volume de cargas transportadas por todas as modalidades não-rodoviárias de transporte representava 92,4% (WYTHE, 1968), no ano de 1970 as estradas de rodagem já eram responsáveis por cerca de 73% de todo o movimento de cargas do país (BARAT, 1978). Na atual realidade brasileira, o setor de transporte rodoviário possui papel fundamental, pois detém cerca de 96,2% da matriz de transporte de passageiros e de 61,8% da matriz de transporte de cargas, sendo assim, o monitoramento deste setor, com uma constante avaliação da malha rodoviária, torna-se cada vez mais necessário para o desenvolvimento da economia regional como subsídio ao planejamento estratégico.

Os pavimentos asfálticos são dimensionados para atender a certa demanda em uma determinada vida útil. Esta, porém, pode não ser atendida, seja pelo uso inadequado da via, ou pela sua má execução. Os defeitos dos pavimentos podem aparecer de diversas maneiras e intensidades, comprometendo assim a funcionalidade e segurança da via (REIS, 2002).

Com base na Pesquisa Rodoviária CNT (2006), ao se avaliar o estado de conservação das rodovias brasileiras, comprovou-se o quadro desfavorável em que as mesmas se encontram. Foram pesquisados 8.811 km na região Norte, 24.432 km no Nordeste, 12.397 km no Centro-Oeste, 23.589 km no Sudeste e 15.153 km na região Sul, totalizando 84.382 km. A avaliação do cenário nacional resulta em situação

desfavorável, onde 75,0% da extensão pesquisada apresentaram algum grau de imperfeição (38,4% regulares, 24,4% ruins e 12,2% péssimos). Como exemplo disso tem-se que: 54,5% da extensão pesquisada se encontram com pavimento em estado regular, ruim ou péssimo (45.950 km) e 70,3% da extensão apresentam sinalização em estado inadequado (59.309 km). Os trechos com afundamentos, ondulações ou buracos acumulam 12,6% (10.615 km) (CNT, 2006).

Ainda segundo a mesma pesquisa citada anteriormanete, é possível concluir que as deficiências na infra-estrutura rodoviária comprometem a integração com as demais modalidades, gerando restrições operacionais e dificultando o crescimento da intermodalidade. Todo crescimento econômico do país deve ser precedido por uma situação favorável dos sistemas de transportes, o que requer melhorias significativas da rede atual, além da expansão do sistema rodoviário nacional.

Com a demanda de tráfego crescente e a idade dos pavimentos avançando, fica cada vez mais difícil reverter o quadro de deterioração, considerando o nível crescente das restrições orçamentárias destinadas à conservação/restauração, os problemas institucionais do setor e as constantes mudanças nas políticas rodoviárias. Além disso, sabe-se que as irregularidades aumentam mais rapidamente quando a manutenção é negligenciada, tornando as restaurações cada vez mais onerosas.

Soluções inovadoras de engenharia são imprescindíveis para que os escassos recursos dos órgãos públicos, hoje destinados prioritariamente a restauração pesada ou reconstrução, possam ser melhor empregados de forma planejada e sistêmica na conservação preventiva, ampliação da malha existente e, principalmente, na pavimentação da rede municipal.

A tecnologia de materiais asfálticos e de misturas evoluiu muito nas últimas três décadas. Para a camada de rolamento, vem crescendo a utilização em países desenvolvidos, de misturas asfálticas mais resistentes e duráveis, sendo que algumas destas soluções envolvem o emprego de graduação descontínua, tal como o SMA (Stone Matrix Asphalt – Matriz Pétreas Asfáltica). O SMA tem sido muito utilizado na Europa (Alemanha, Bélgica, entre outros), bem como na América do Norte (Estados Unidos e

Canadá). Sua aplicação tem sido realizada principalmente em vias de tráfego intenso e/ou pesado e aeroportos, seja como camada de alta resistência e alta durabilidade, seja para auxiliar na aderência em pista molhada, na diminuição efetiva do *spray* ou borrifo de água pelos pneus, na redução da reflexão de luzes de faróis em noites chuvosas e na redução de ruídos nas áreas lindeiras à via (MOURÃO, 2003).

As misturas SMA são normalmente caracterizadas por apresentarem uma graduação descontínua, com elevada quantidade de agregados graúdos (70 a 80% em peso da mistura), porcentagem de volume vazios da ordem de 4%, e teor de ligantes variando de 6 a 7%. Com o objetivo de se evitar o escorrimento do ligante asfáltico durante as operações de mistura e compactação a elevadas temperaturas, que ocorre principalmente pelas características granulométricas das misturas, são também incorporadas fibras às misturas, em geral fibras de celulose (VASCONCELOS, 2004).

Dentro deste contexto, esta pesquisa consiste no estudo sobre a viabilidade da incorporação de fibras de coco verde em misturas do tipo SMA, como alternativa à das fibras de celulose. Segundo a Associação de Produtores de Coco (ASBRACOCO, 2006) e a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA, 2006), localizada em Fortaleza/CE, são gerados anualmente 6,7 milhões de toneladas de casca de coco verde no Brasil por ano, transformando-se em um sério problema ambiental, principalmente para as grandes cidades.

A casca de coco verde, subproduto do uso e da industrialização da água de coco, é depositada em lixões e às margens de estradas. É um material de difícil decomposição levando mais de 8 anos para se decompor. Além de foco e proliferação de doenças, diminui a vida útil de aterros sanitários. Portanto, a utilização da casca de coco verde processada, além da importância econômica e social, é também importante no ponto de vista ambiental. Segundo ROSA *et al.* (2001), 80 a 85% do peso bruto do coco verde é considerado lixo.

Em 2 de julho de 2005 foi inaugurada a primeira unidade de beneficiamento de casca de coco do Nordeste, como ilustrado na Figura 1.1. A unidade de beneficiamento está instalada na estação de triagem e transbordo de resíduos sólidos de Fortaleza, no

bairro do Jangurussu, em uma área de 3.000 m², e fabrica produtos a partir do pó e das fibras extraídas da casca, com capacidade para processar 30 toneladas de casca/dia. Cerca de 1.600 toneladas/ano de pó serão produzidos para utilização como substrato agrícola e composto orgânico e as 530 toneladas/ano de fibra bruta geradas pela unidade vão servir como matéria-prima para a fabricação de 27.600 peças de derivados da fibra, como placas, vasos e bastões e 25.000 peças de artesanatos diversos. A fábrica também vai abrigar um espaço para a confecção dos produtos derivados da casca de coco verde (EMBRAPA, 2006).



Figura 1.1: Unidade de beneficiamento de casca de coco do nordeste – Fortaleza/CE
(Fonte: ROSA *et al.*, 2004).

A presente pesquisa visa tanto o estudo das misturas do tipo SMA convencionais bem como a utilização de fibras de coco como material alternativo. Para construção de 1 km de rodovia são necessárias aproximadamente 800 toneladas de mistura asfáltica SMA e, conseqüentemente, 4 toneladas de fibra de coco ou 2,4 toneladas de fibra de celulose. O custo em torno de cada tonelada de fibra de coco é de R\$ 600,00 (Fonte: EMBRAPA/CE, 2006) enquanto que o custo da fibra de celulose é em torno de R\$ 5.000,00 (Fonte: EMPRESA J. RETTENMAIER LATINOAMERICANA LTDA/SP, 2007). A utilização de fibra de coco como alternativa em substituição à incorporação de fibra de celulose representa uma economia de 80% no custo da construção de 1 km de rodovia.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo geral dessa pesquisa é avaliar a viabilidade da incorporação de fibras de coco, devido à abundância deste material na região Nordeste, em misturas asfálticas do tipo SMA, como alternativa à substituição da incorporação das fibras de celulose, assim como o efeito produzido por estas fibras nos parâmetros obtidos e comportamento mecânico de tais misturas.

1.2.2 Objetivos Específicos

Dentre os objetivos específicos desta dissertação, podem-se citar:

- Estudar os procedimentos de dosagem (Marshall e Superpave) das misturas do tipo SMA, sem e com a adição de fibras (coco e celulose);
- Verificar a viabilidade do uso de fibras de coco, para se evitar o escorrimento do ligante asfáltico nas operações de mistura, transporte e compactação;
- Propor procedimentos de dosagem com as fibras de coco nas misturas asfálticas;
- Avaliar o comportamento mecânico das misturas SMA por meio de ensaios de resistência à tração estática por compressão diametral (RT), módulo de resiliência (MR), fadiga por compressão diametral à tensão controlada e resistência à tração retida por umidade induzida (RRT), através da inserção de fibras de coco e celulose em comparação com as misturas sem fibras;
- Avaliar vantagens de aplicabilidade do uso das fibras de coco, tanto no âmbito sócio-econômico quanto ambiental.

1.3 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

O presente trabalho encontra-se organizado da seguinte forma:

- Capítulo 1: apresenta a importância nacional do tema da dissertação, a justificativa da necessidade de revestimentos asfálticos de maior durabilidade e de alta resistência, os objetivos a serem atingidos em função da potencialidade da técnica SMA, finalizando com a organização da estrutura da pesquisa.
- Capítulo 2: apresenta a revisão bibliográfica, esboçando um breve histórico sobre o estado da arte do tema proposto, concepção e o princípio de funcionamento da mistura asfáltica tipo SMA, como também uma bibliografia sobre as fibras de coco verde, objetivo de estudo da pesquisa em questão.
- Capítulo 3: aborda a caracterização dos materiais utilizados bem como resultados da caracterização desses materiais e dos procedimentos de ensaio utilizados.
- Capítulo 4: apresenta a granulometria adotada, bem como os resultados dos procedimentos de dosagem Marshall e Superpave.
- Capítulo 5: apresenta os resultados e análises da caracterização mecânica das misturas estudadas, que foi realizada por meio dos ensaios de resistência à tração estática por compressão diametral (RT), módulo de resiliência (MR), fadiga por compressão diametral a tensão controlada e resistência à tração retida por umidade induzida (RRT).
- Capítulo 6: apresentam-se as conclusões deste estudo, bem como recomendações para pesquisas futuras.

CAPÍTULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo apresenta-se a revisão bibliográfica sobre o assunto em questão, esboçando um breve histórico da mistura asfáltica tipo do SMA, como também sobre a fibra de coco. Divide-se o capítulo em quatro itens principais: (i) misturas asfálticas do tipo SMA, (ii) densidade máxima teórica, (iii) fibras de coco e (iv) alternativas do aproveitamento do coco.

2.1 MISTURAS ASFÁLTICA DO TIPO SMA

2.1.1 Breve Histórico

O SMA – Stone Matrix Asphalt (Matriz Pétreo Afáltica) foi concebido na Alemanha, em 1968, quando foi aplicada uma capa de rolamento de apenas 2cm de espessura, composta por 75% de agregados de 5 – 8mm, 15% de material de 0 – 2mm, 10% de fíler mineral e 7% de ligante betuminoso em ralação ao peso total da mistura. Para evitar o escorrimto, sobretudo do ligante asfáltico, uma vez que a mistura era aplicada em torno de 180°C, foram inseridas fibras orgânicas como aditivo estabilizador (VASCONCELOS, 2004).

A presença de fibras na mistura faz com que a mesma possa submeter-se a temperaturas altas e baixas, sem perder sua eficiência e sem sofrer degradação. Esta elevada flexibilidade impede o ressecamento e a fissuração que se produz habitualmente em misturas asfálticas comuns, expostas às condições de variações climáticas (LANCHAS, 1999). Permite também que o ligante betuminoso fique mais consistente a altas temperaturas, diminuindo a formação dos afundamentos de trilha de roda, visto que o ligante betuminoso é empregado em porcentagens elevadas, variando de 6,5 a 8,0% em peso, nas misturas asfálticas do tipo SMA.

As fibras podem ser oriundas de celulose (orgânica), vidro (inorgânica) ou material mineral. São comumente utilizadas na Europa e na América do Norte as fibras de celulose ou minerais, correspondendo a 0,3% em peso do total da mistura no caso europeu, e a 0,3 – 0,4% no norte-americano. Do ponto de vista funcional, as fibras de celulose apresentam vantagens em relação às minerais, por serem totalmente inócuas à saúde e serem produzidas a partir de fontes renováveis.

As fibras de celulose podem ser fornecidas soltas ou em forma granular, podendo ou não ser impregnadas com ligante asfáltico. Se contiver betume, este conteúdo deverá ser levado em consideração na determinação do teor ótimo de ligante na mistura SMA.

Segundo especificações finlandesas (PANK, 1995) é recomendada a adição de diferentes tipos fibras em misturas asfálticas SMA, como mostrado na Tabela 2.1.

Tabela 2.1: Recomendações finlandesas para adição de fibras em misturas asfálticas tipo SMA em relação ao peso total da mistura ligante – agregado (PANK, 1995).

Tipo	Percentual de fibra na mistura (%)
Fibra de celulose	0,3 - 0,5
Fibra mineral	0,7 - 0,9
Fibra de vidro	0,4 - 0,6

Com o objetivo de evitar a formação de grumos ou uma homogeneização inadequada, recomenda-se o uso de fibras de celulose em forma granular (*pellets*). *Pellets* consistem em 50% de fibras de celulose com 50% de ligante asfáltico. Deve-se tomar cuidado para que os *pellets* se dissolvam completamente na mistura, evitando assim problemas na execução da camada.

As fibras de celulose exercem a função de evitar o escorrimento do ligante betuminoso e da argamassa quando da usinagem, transporte e aplicação, pelo fato de desempenharem uma ação de microarmadura (reticulado tridimensional) que em conjunto com os polímeros presentes no ligante betuminoso aumentam a coesão do sistema. Com a incorporação de parte do ligante pelas fibras pode-se formular misturas flexíveis com alta porcentagem de ligante betuminoso, sem riscos de exsudação ou

perda de estabilidade mecânica. Se não empregadas, ou se forem utilizadas de forma ou em dosagem inadequada, provavelmente pontos de exsudação e de segregação da mistura serão observados na pista.

As fibras possibilitam a utilização de granulometria descontínua, o que aumenta a macrotextura do revestimento, melhorando as características mecânicas de drenagem superficial e aderência dos pneus ao pavimento, principalmente pela redução dos efeitos de aquaplanagem (BELIGNI, 2000).

A adição de fibras de celulose não modifica quimicamente o ligante, porém, até certo ponto, aumenta as propriedades físicas do produto final, por admitir o uso de elevado teor de ligante. E isso tende a aumentar a viscosidade do ligante para que este não escorra do agregado antes da compactação (HORST, 2000).

Decorridos mais de 30 anos, o excelente desempenho desta técnica em rodovias de tráfego pesado provou ser uma solução eficaz para reduzir, principalmente, os afundamentos nas trilhas de roda e o desgaste da superfície causado pelo atrito entre o pneu e o revestimento.

Em 1984, a Alemanha publicou a primeira norma para SMA e, então, sua utilização como camada de rolamento foi difundida e normalizada para vários países da Europa. Segundo dados publicados pela EAPA (2004), a Alemanha apresentava em 2002, mais de 100 milhões de m² construídos em SMA, seguida pela Espanha (69 milhões de m²), Suécia (50 milhões de m²), Holanda (32 milhões de m²) e França (18 milhões de m²).

As faixas granulométricas 0/8S mm e 0/11S mm da norma alemã são as mais empregadas neste país, como mostrado na Tabela 2.2. A adoção do SMA vem sendo intensificada em outros países europeus, como Bélgica, Holanda, Suíça, entre outros, dados os sucessos consagrados ao longo de mais de duas décadas. Na Bélgica, a experiência tem se estendido com SMA na faixa cujo tamanho máximo do agregado é maior (0-16mm), com sucessos em vias de tráfego pesado e espessuras de cerca de 6 cm (FRANCKEN e VANELSTRAETE, 1995).

Tabela 2.2: Faixas granulométricas – Alemanha (REIS, 2002).

Peneiras (abertura)	Faixas - SMA			
	Tráfego Pesado		Tráfego Médio	
	0/11 S	0/8 S	0/8	0/5
> 11,2 mm	≤ 10	-	-	-
> 8,0 mm	≥ 40	≤ 10	≤ 10	-
> 5,0 mm	60 – 70	55 – 70	45 – 70	≤
> 2,0 mm	75 – 80	75 – 80	70 – 80	60 – 70
> 90 μm	9 – 13	10 – 13	8 – 13	8 – 13

Em 1990, especialistas em pavimentos dos EUA visitaram cinco países da Europa. Um dos propósitos da missão técnica era a transferência e a implementação desta nova tecnologia na América do Norte. Em 1991, segundo o *National Cooperative Highway Research Program – NCHRP*, vários projetos e artigos foram publicados no Canadá e EUA relatando aspectos relacionados ao projeto de dosagem, aplicação e de desempenho do SMA (NCHRP, 1999).

Em 1993, vinte e um estados americanos executaram aproximadamente cinquenta e quatro projetos em SMA e estava sendo planejada a execução de mais de vinte projetos (NAPA, 1999).

Em 1996, foi executada uma seção experimental em SMA na área urbana de Londres, Inglaterra. Os resultados iniciais indicaram um substancial aumento na aderência pneu/pavimento (SLATER *et al.*, 1996).

Em 1997, duas experiências em Toronto (Canadá) sendo uma delas um teste acelerado de durabilidade no circuito urbano da fórmula Indy, demonstraram a viabilidade técnica e econômica do SMA para o revestimento de vias urbanas (WOODMAN *et al.*, 1997).

Em 1997, no mínimo vinte e oito estados americanos já tinham executado mais de cem projetos, totalizando cerca de três milhões de toneladas de SMA. O *National Center for Asphalt Technology (NCAT)* em conjunto com a *Federal Highway Administration (FHWA)*, publicaram um relatório atestando o bom comportamento do

SMA em áreas sujeitas a alto volume de tráfego, sendo o maior custo de construção amplamente compensado que agrega seu desempenho (NAPA, 1999).

Em 1998, o NCAT desenvolveu e validou para o NCHRP, uma metodologia detalhando os procedimentos para o projeto de mistura, construção e controle de qualidade do SMA (NCHRP, 1999). A partir de 1999, a Alemanha adotou o uso do SMA para rodovias de tráfego pesado em substituição ao concreto asfáltico de granulometria densa (ZTV ASPHALT – StB 94, 1998). Portanto, desde o início da década de 90, o SMA é muito popular na América do Norte e Europa (EMERY *et al.*, 1996; WOODMAN *et al.*, 1997; SCHNIEDLIN, 1999;).

O emprego desta tecnologia também foi estendido para o México com sucesso (PERDRAZA, 1999). Recentemente uma experiência pioneira foi realizada na Argentina, nas faixas 0/11S mm e 0/8S mm, em auto-estrada nas proximidades de Buenos Aires (BOLZAM, 2000).

No aeroporto de Beijing (China) o SMA foi comparado com CBUQ (Concreto Betuminoso Usinado à Quente) e um OGFC (*Open Graded Friction Course* – camada porosa de atrito), tendo o SMA apresentado melhor comportamento em todos os requisitos estruturais e de durabilidade, sendo seu comportamento similar ao OGFC quanto ao caráter funcional (XIN, 1998).

Em 2000, a mistura asfáltica SMA foi utilizada nos serviços de recapeamento do Autódromo de Interlagos – SP, para a realização de etapa Brasil do circuito da Fórmula 1 (BELIGNI, 2000). Em 2001, também no Brasil, foi realizada uma aplicação pioneira em rodovias de alto tráfego no estado de São Paulo, com o objetivo de avaliar o desempenho do revestimento de SMA. Em novembro de 2006, no estado do Ceará foi construído um trecho de 30km de SMA na BR-116, rodovia que liga Fortaleza ao município de Pacajus.

2.1.2 Conceito e Princípio de Funcionamento do SMA

A mistura asfáltica SMA é caracterizada pelo elevado conteúdo de agregado que forma o esqueleto mineral. Os vazios no esqueleto mineral são preenchidos por um mástique betuminoso de elevada viscosidade, um tipo de argamassa que é a composição do ligante betuminoso modificado ou não por polímeros, fíler (natural ou artificial), finos minerais (fração areia) e fibras naturais (minerais ou orgânicas). O elevado conteúdo de agregado graúdo, de pelo menos 70%, assegura o contato entre grãos depois da compactação. A rigidez necessária para o mástique é alcançada por meio da adição da fração britada (HORST, 2000).

O SMA é uma mistura flexível, estável, resistente a afundamentos de trilha de roda que tem no contato entre grãos o responsável por sua resistência, e no mástique a durabilidade da mistura (NAPA, 2002). A granulometria de uma mistura asfáltica tipo SMA é caracterizada por conter uma elevada porcentagem de agregados graúdos (70–80% retido na peneira nº.10) e formar um grande volume de vazios entre estes que será preenchido pelo mástique asfáltico. Esta elevada porcentagem de agregados graúdos faz com que a mistura tenha excelente desempenho mecânico (Figura 2.2).

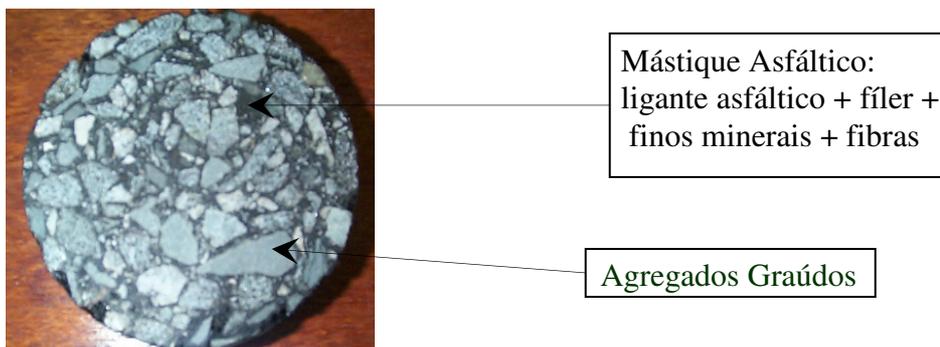


Figura 2.2: Composição do SMA.

O mástique asfáltico é o responsável pela elevada coesão da mistura, e sua elevada porcentagem faz com que a mistura apresente baixo índice de vazios, retardando o processo de oxidação e aumentando a resistência da mistura pelo envolvimento e intertravamento dos agregados minerais.

O SMA é utilizado como camada de rolamento numa espessura variando de 1,5 a 4,0cm em função do diâmetro máximo do agregado mineral utilizado na composição da mistura. Não é recomendada a utilização do SMA em espessuras muito superiores a 4,0cm, em decorrência de possibilidade de deformações permanentes, ou seja, maior probabilidade de formação de afundamentos de trilha de roda. No decorrer dos anos o SMA vem sendo utilizado como alternativa para rejuvenescimento de superfícies deterioradas. Para pavimentos que apresentam uma elevada capacidade estrutural, o SMA é empregado visando uma melhoria do desempenho funcional (conforto e segurança aos usuários). Neste caso, a camada delgada de SMA pode ser denominada de micro concreto asfáltico à quente, sendo aplicada numa espessura variando entre 1,0 e 2,0cm (BELIGNI, 2000).

Ao se escolher uma granulometria diferenciada para a mistura SMA, em relação ao CBUQ tradicional, pretende-se que a maior porcentagem de grãos grossos forme uma estrutura compacta e entrelaçada que contribua para dissipar o carregamento do tráfego. Este é um dos motivos pelo qual o SMA é tão resistente ao desgaste e à deformação permanente. Devido à estrutura tridimensional da fibra de celulose, o ligante betuminoso mantém uma elevada viscosidade, impedindo assim o escorrimento do ligante durante o armazenamento, o transporte e a aplicação da mistura. Também possibilita maior concentração de ligante na mistura, o que forma uma película mais espessa de ligante em volta dos agregados, inibindo a oxidação, penetração de umidade, separação e fissuração dos grãos (LANCHAS, 1999).

A principal diferença entre a mistura asfáltica SMA e o CBUQ é a descontinuidade da curva granulométrica, que proporciona ao SMA um maior volume de vazios no agregado mineral (VAM). O aspecto rugoso da camada porosa de atrito (CPA) se assemelha ao da mistura asfáltica SMA, bem como a formação do esqueleto mineral que dá resistência à mistura. A Figura 2.3 mostra a diferença entre as curvas granulométricas médias das misturas SMA – Faixa 0/11S Alemã, CBUQ – Faixa B do DNER e CPA – Faixa III do DNER.

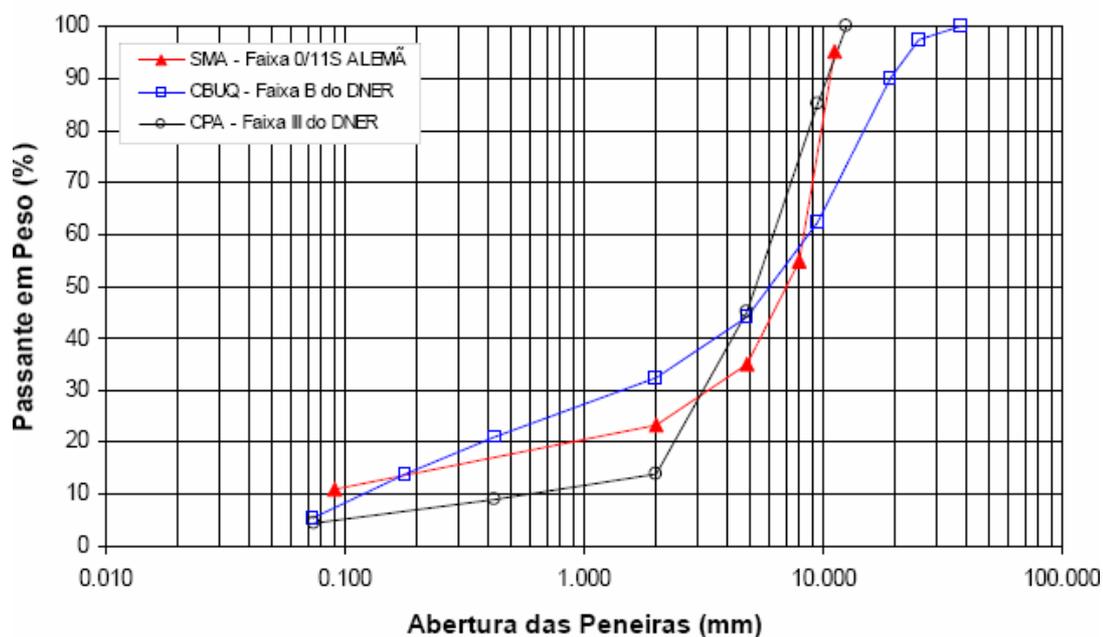


Figura 2.3: Comparação entre as curvas granulométricas médias de cada faixa de tipos de misturas SMA, CBUQ e CPA (MOURÃO, 2003).

Do ponto de vista volumétrico, os agregados graúdos do SMA representam o resistente esqueleto mineral da estrutura, semelhante à camada porosa de atrito (CPA). A diferença básica é que a mistura CPA necessita de um menor conteúdo de argamassa para preencher seus vazios, permanecendo um volume residual de vazios com ar, cerca de 20%, conforme descrito na Tabela 2.3 e mostrado na Figura 2.4.

Tabela 2.3: Composição média dos materiais nas misturas asfálticas (REIS, 2002).

Materiais	SMA 0/11	CBUQ 0/11	CPA 0/11
Agregado graúdo > 4,75 mm (%p/p)	70-80	45-55	70-90
Agregado fino < 4,75 mm (%p/p)	20-30	45-55	10-30
Fíler mineral < 0,075 mm (%p/p)	8-13	5-10	2-5
Ligante asfáltico (%p/p)	6-7	5-6	4-5
Fibras (%p/p)	0,3-1,0	-	-
Vazios na mistura (%v/v)	3-4	3-5	18-25

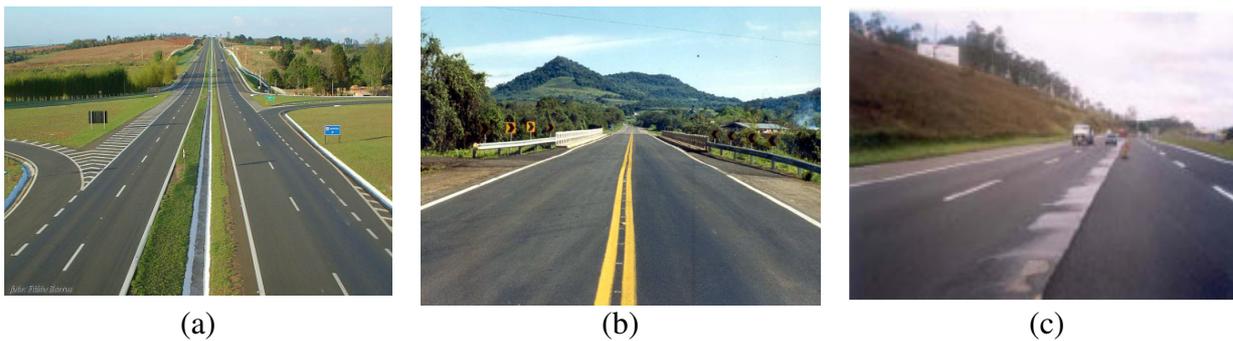


Figura 2.4: (a) SMA aplicado na via Anchieta no estado de São Paulo; (b) CBUQ aplicado na BR – 116 no estado do Ceará e (c) CPA aplicado na rodovia SP 160 Ecovias no estado de São Paulo (Fonte: ARTESP, 2007)

No SMA a condição para se garantir um elevado atrito interno da mistura é satisfeita quando o volume de vazios da fração de agregado graúdo (VCAdrc) é maior que o volume da argamassa (VCAmix), permanecendo um volume residual de vazios com ar entre 3% a 4%.

Alguns conceitos e requisitos volumétricos do SMA não são usualmente empregados para outras misturas asfálticas e são obtidos através de relações matemáticas (massa/volume), assim definidos:

- O valor de VCAdrc é obtido considerando-se apenas o volume de ar, quando somente a fração de agregado é compactada (Figura 2.5);
- O valor de VCAmix é obtido considerando-se todos os componentes da mistura, exceto o agregado graúdo;
- O valor de VAM é obtido considerando-se todos os componentes da mistura, exceto os agregados (graúdo e fino), expresso em porcentagem do volume total do corpo de prova compactado;
- Os valores de VCAmix e VAM são obtidos considerando-se o ligante asfáltico absorvido pelo agregado como parte integrante do mesmo.

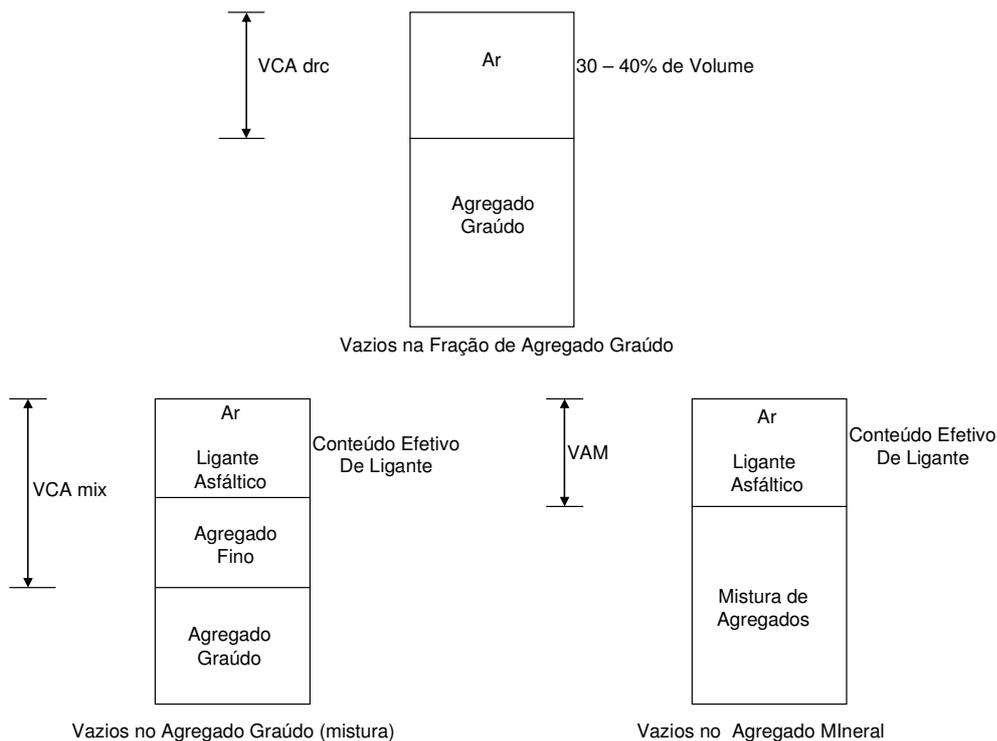


Figura 2.5: Diagrama dos componentes – SMA (Fonte: REIS, 2002).

A ausência de grãos médios e a alta concentração de agregados graúdos se traduzem em uma superfície mais rugosa, com uma textura mais grossa, que formam pequenos “canais” entre os agregados graúdos, aumentando a resistência ao deslizamento e a absorção de ruído, reduzindo a reflexão de luz e a aquaplanagem.

Sabe-se que os afundamentos plásticos em trilhas de roda podem ser decorrentes da fluência excessiva da mistura asfáltica do revestimento, somada à ação do tráfego e a de temperaturas elevadas, ou também pela combinação de deformações plásticas de várias camadas do pavimento.

Segundo REIS *et al.* (2001a), baseado em dados experimentais, a mistura asfáltica SMA tem se mostrado um revestimento de alto desempenho estrutural e funcional. Insucessos que ocorreram em alguns casos estão relacionados, em geral, à falhas executivas, ligadas à segregação e à exsudação, que podem ser contornadas se houver um bom controle dos agregados e da faixa de projeto, dosagem apropriada do teor de ligante e de fibras, e controle de temperatura de usinagem e compactação.

Em misturas asfálticas a exsudação do ligante ocorre sob a forma de manchas isoladas ou em grande extensão (espelhamento) e a excessiva presença de cimento asfáltico na superfície é identificada pelo aparecimento de marcas causadas por pneus em dias quentes. Em geral, a exsudação do ligante está associada à migração do cimento asfáltico para a superfície motivada por: (i) segregação da mistura em alguns momentos de sua execução; (ii) compactação excessiva da mistura; (iii) excesso de ligante na mistura; (iv) emprego de ligante com viscosidade baixa em local com clima quente e (v) a falta de adesividade do ligante asfáltico (BALBO, 1997). A exsudação do ligante pode aparecer em misturas asfálticas SMA também pela falta ou distribuição não homogênea da fibra, alimentação inadequada de fíler na mistura e perda excessiva de temperatura da massa asfáltica para aplicação.

2.1.3 Características do Desempenho da Mistura Asfáltica SMA

Segundo NAPA (2002), um estudo na Alemanha indicou redução do nível de ruído de até 2,5dB quando usada a mistura SMA sobre uma mistura asfáltica densa convencional. Essa redução chega a 7,0dB em um estudo feito na Itália, onde foi comparada a mistura asfáltica SMA, com tamanho máximo nominal do agregado de 15mm, com uma mistura asfáltica densa convencional, com o mesmo tamanho máximo nominal do agregado.

A mistura asfáltica SMA tem provado ser excelente opção para vias de tráfego pesado, entre outras utilizações, como por exemplo:

- Vias com alta frequência de caminhões;
- Interseções;
- Em áreas de carregamento e descarregamento de cargas;
- Em rampas, pontes, paradas de ônibus, faixa de ônibus;
- Pistas de aeroporto;
- Estacionamentos;
- Portos.

Segundo HORST (2000) a graduação descontínua da mistura SMA reduz consideravelmente a emissão de ruído, sendo o ruído do tráfego absorvido por sua macro-textura. A matriz pétreo pode acomodar as desigualdades do pavimento subjacente, melhorando o conforto do usuário ao dirigir.

2.2 DENSIDADE MÁXIMA TEÓRICA

A Densidade Máxima Teórica ou DMT é numericamente igual à razão entre a massa do agregado somada ao ligante asfáltico e à soma dos volumes dos agregados, vazios impermeáveis, vazios permeáveis não preenchidos com asfalto e total de asfalto (ROBERTS *et al.*, 1996), conforme ilustrado na Figura 2.6.

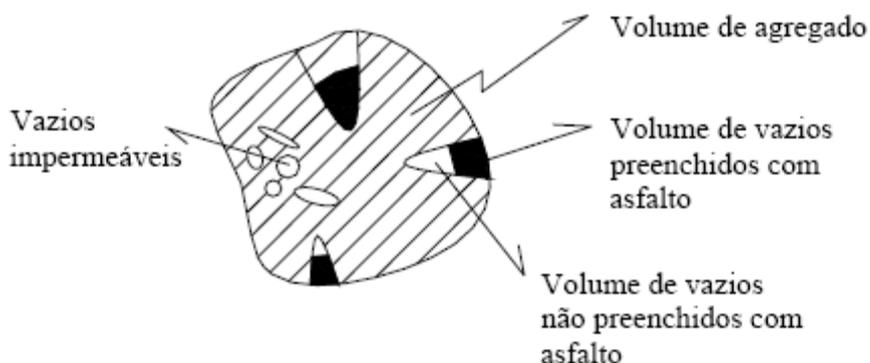


Figura 2.6: Ilustração da DMT para misturas asfálticas

(Fonte: VASCONCELOS, 2004).

A DMT, além de usada no cálculo do percentual de vazios de misturas asfálticas compactadas, é utilizada no cálculo da absorção de ligante pelos agregados, da densidade efetiva do agregado, do teor de asfalto efetivo da mistura asfáltica e para fornecer valores alvo para a compactação de misturas asfálticas através do compactador giratório (ASTM D 2041). Uma outra utilização da DMT é na determinação da massa específica de misturas asfálticas já compactadas em campo. Juntamente com a espessura do pavimento, a DMT é necessária para que se estime a massa específica da mistura, sem extração de corpos-de-prova, através do método nuclear (SCHMITT *et al.*, 1997). Atualmente, muitos estados americanos especificam a massa específica de misturas asfálticas obtida em campo como um percentual da DMT (ROBERTS *et al.*, 1996).

Nos estados americanos, o método Rice, descrito no item 2.2.3 (ASTM D 2041 e AASHTO T-209), é convencionalmente adotado. Existem, porém, propostas de outros procedimentos em substituição ao método Rice, como o apresentado por FRANCO e LEE (1990). O método foi chamado pelos autores de *pressure method* e é parte dos procedimentos descritos nas normas ASTM C 231 e AASHTO T-158, que trabalha segundo o princípio da lei de Boyle. O método consiste em igualar um volume conhecido de ar a uma pressão conhecida, em uma câmara de ar selada, com um volume desconhecido de ar, em uma amostra de mistura asfáltica e água.

2.2.1 Ponderação das Densidades Reais

A determinação da DMT é comumente realizada por meio de uma ponderação das densidades reais dos materiais que compõem a mistura asfáltica. O ensaio de densidade nestes agregados é feito segundo o DNER: para agregado graúdo - DNER-ME 81/98 e para agregado miúdo - DNER-ME 84/95. De posse das densidades reais de todos os materiais e suas respectivas proporções, faz-se uma ponderação para a determinação da DMT da mistura para os diferentes percentuais de ligante. A Equação 2.1 apresenta a fórmula adotada para o cálculo da DMT através dos pesos (P_i) e das densidades reais (D_{CAP} e D_{ai}) dos materiais constituintes.

$$DMT = \frac{P_{CAP} + P_1 + P_2 + \dots + P_n}{\frac{P_{CAP}}{D_{CAP}} + \frac{P_1}{D_{a1}} + \frac{P_2}{D_{a2}} + \dots + \frac{P_n}{D_{an}}} \quad (2.1)$$

Onde,

P_{CAP} = Peso do ligante;

P_n = Peso das frações dos agregados.

Segundo LEAHY e McGENNIS (1999), a Equação 2.1 foi inicialmente apresentada no primeiro manual de dosagem do Instituto do Asfalto. Nessa publicação, é deixado a critério do projetista qual densidade dos agregados deve ser utilizada (aparente, real ou efetiva). Apesar de conveniente, o uso da densidade aparente resulta em um teor de vazios inferior ao real, visto que não é assumida absorção de asfalto. A adoção da densidade real também apresenta valores de vazios errôneos (superiores).

Nesse caso é assumido que a absorção de asfalto é igual à absorção de água. Mc LEOD (1957) *apud* LEAHY e McGENNIS (1999) defendeu a utilização da densidade efetiva de agregados, a fim de obter o volume de vazios definido como “volume total das pequenas bolsas de ar entre os agregados cobertos com ligante”.

Quando da ponderação das densidades reais dos materiais para cálculo da DMT, adota-se um conceito diferente de DMT daquele ilustrado na Figura 2.6. A densidade real dos agregados é numericamente igual à razão entre a massa da parte sólida e a soma do volume de agregados e vazios impermeáveis, conforme ilustrado na Figura 2.7. A densidade do ligante asfáltico considera apenas o volume da parte sólida (DNER-ME 193/96).



Figura 2.7: Ilustração do volume considerado na determinação da densidade real de agregados e ligante asfáltico (Fonte: VASCONCELOS, 2004).

2.2.2 Método do Querosene

O ensaio proposto por CASTRO NETO (1996) para determinação da DMT foi concebido visando criar um método em que os vazios de ar fossem expulsos da mistura sem a aplicação de vácuo. A motivação da proposição se deveu à dificuldade da realização do ensaio com aplicação de vácuo em obras, como é obrigado no Rice, visando implementar um processo que não utilizasse equipamentos sofisticados. Como o querosene é um diluente do asfalto, o estudo de uma metodologia que pudesse substituir a norma ASTM D 2041 foi iniciado.

Segue um resumo do procedimento realizado em laboratório para a determinação da DMT de misturas asfálticas através do método proposto por CASTRO NETO (1996), aqui denominado “método do querosene”.

- determinar a massa do picnômetro (P);
- completar o picnômetro com querosene com auxílio do Becker e determinar a massa do picnômetro completo com querosene (P_1) para temperaturas entre 10 e 35°C;
- determinar a massa do picnômetro completo com água destilada (P_2) para temperaturas entre 10 e 35°C;
- adicionar aproximadamente 1l de querosene no picnômetro e determinar a massa do conjunto (P_3) a qualquer temperatura;
- verter a mistura betuminosa lentamente dentro do picnômetro com querosene com o auxílio da espátula e funil. A quantidade mínima da amostra deve ser de 1200g com diâmetro máximo de 19,1mm e sua temperatura deve estar próxima de 100°C;
- determinar a massa do conjunto (P_4);
- realizar pequenos movimentos de rotação no conjunto e, logo após, agitar a amostra com uma haste para expulsão dos possíveis vazios. Ao retirar a haste, limpá-la com a pisseta;
- completar o picnômetro com querosene, colocar a tampa e determinar a nova massa (P_5);
- imediatamente após a determinação da massa (P_5), agitar a mistura e determinar a temperatura da mistura t com precisão de 0,5°C. É conveniente que a temperatura esteja entre $\pm 5^\circ\text{C}$ em relação à temperatura ambiente.

Após o procedimento descrito acima é possível calcular a massa específica máxima (MEM) da mistura a uma dada temperatura (t) através da Equação 2.2:

$$MEM(t) = \frac{(P_4 - P_3) \times (P_1 - P)}{(P_4 + P_1 - P_5 - P_3) \times (P_2 - P)} \quad (2.2)$$

A determinação da massa específica máxima a 25°C é dada por:

$$MEM(t) = \frac{(P_4 - P_3) \times (P_1 - P)}{(P_4 + P_1 - P_5 - P_3) \times (P_2 - P)} \quad (2.3)$$

Para a utilização desta fórmula, CASTRO NETO (1996) admitiu que a variação volumétrica por cm^3 por °C de uma amostra com 5% de ligante seja de $3,783 \times 10^{-5} \text{cm}^3$, conforme ASTM D 2041. A DMT no ensaio, denominada DMTE, é obtida pela Equação 2.4:

$$DMTE = \frac{MEM(25^\circ C)}{0,9971} \quad (2.4)$$

A calibração do picnômetro é um passo indispensável para boa aproximação dos resultados. O peso do picnômetro completo com querosene, assim como com água destilada, varia de forma considerável com a temperatura que o conjunto apresenta. É importante que o picnômetro apresente tampa de borracha, para evitar entrada da parte líquida entre a tampa e o picnômetro, e que dentro da borracha exista um orifício preenchido com vidro, para que a leitura seja realizada em uma marca de referência nesse vidro de diâmetro reduzido, conforme ilustrado na Figura 2.8. Quanto menor o diâmetro, mais precisas serão as leituras, porém é importante que o diâmetro permita colocação do material líquido com uma pipeta.



Figura 2.8: Ilustração da tampa de borracha com orifício preenchido com vidro de diâmetro reduzido (Fonte: VASCONCELOS, 2004).

Nas conclusões apresentadas por CASTRO NETO (1996), foi verificado que durante a execução dos ensaios o querosene desestrutura qualquer grumo de ligante e agregado, fazendo com que a quase totalidade dos vazios fosse expulsa logo no primeiro contato entre estes constituintes. Isso pode ser explicado também pelo fato da temperatura de execução do ensaio chegar a próximo de 100°C, facilitando essa desestruturação. Esse é um fato relevante, pois se esse fenômeno realmente acontece, está se incorrendo na mesma inconsistência da determinação da DMT pela ponderação das densidades reais, conforme ilustrado na Figura 2.7. A total desestruturação dos grumos fará com que os vazios permeáveis existentes entre agregado e ligante, ilustrado na Figura 2.6, sejam preenchidos com querosene, modificando assim o volume considerado na determinação da DMT.

2.2.3 ASTM D 2041

A Figura 2.9 ilustra o equipamento utilizado para a determinação da densidade máxima medida (DMM), segundo os métodos americanos ASTM D 2041 e AASHTO T-209, ou o método europeu EN 12697-5. A DMM determinada por meio de vácuo é empregada em projetos de misturas betuminosas dos Estados Unidos, Canadá (MANUAL DE ASFALTO, 1989), África do Sul (JOOSTE *et al.*, 2000), Austrália (APRG, 1997) e Europa (HEIDE e NICHOLLS, 2003).



Figura 2.9: Equipamento para ensaio de DMT com aplicação de vácuo – LMP/UFC.

Para a realização do ensaio pesa-se, inicialmente, 1500g da mistura (para tamanho máximo nominal de até 12,5mm) em um recipiente metálico de peso conhecido. Em seguida, este é preenchido com água a 25°C até que toda a mistura fique

coberta. É então aplicada uma pressão residual no recipiente de 30mmHg (diferença entre 760mm e 730mm), por um período de 15 minutos, a fim de expulsar os vazios existentes entre os filmes de ligante, ilustrado na Figura 2.10. Logo após esse período é restabelecida pressão ambiente no recipiente metálico. Finalmente, o recipiente, juntamente com a mistura e a água, é pesado imerso. A DMT, ou G_{mm} , conforme descrito na referida norma, é determinada por:

$$G_{mm} = \frac{A}{A - (C - B)} \quad (2.5)$$

em que,

A: massa da amostra seca em ar, g;

B: massa do recipiente metálico imerso em água, g;

C: massa do recipiente + amostra imerso em água, g.

Observa-se no procedimento descrito, que a temperatura de ensaio gira em torno da temperatura ambiente, não havendo desestruturação de grumos formados por agregados e ligante asfáltico. A permanência desses grumos faz com que os vazios existentes entre os dois materiais permaneçam sem alteração, tendo o vácuo a função apenas de expulsão dos vazios entre os filmes de ligante, ou seja, entre os grumos (Figura 2.10).

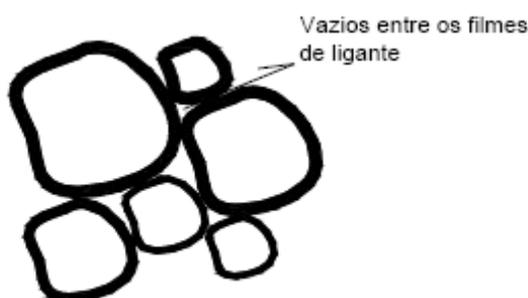


Figura 2.10: Ilustração dos vazios existentes entre os filmes de ligante

(Fonte: VASCONCELOS, 2004).

No trabalho realizado por KANDHAL e KHATRI (1990) foram testadas as variáveis: temperatura do ensaio (69, 77 e 85°F), pressão residual (16, 23 e 30mm Hg) e tempo de vácuo (5, 10 e 15min). Os valores encontrados como níveis ótimos pelos autores são os atualmente apresentados nas normas ASTM D 2041 e AASHTO T-209.

CASTELO BRANCO (2004) cita ainda como vantagens desse método o fato de ser desnecessária a determinação das densidades reais individuais dos agregados, além de haver o desconto dos poros preenchidos com ligante e não com água.

2.3 FIBRAS DE COCO

2.3.1 Proveniência

Existe até o momento um consenso sobre a proveniência do coco, situando-se em toda a faixa tropical do globo, principalmente nas regiões litorâneas. Há documentos que provam a sua existência na costa Asiática há 4000 anos. Quando os espanhóis invadiram a América em 1526, os coqueiros já se encontravam na costa do Pacífico. Alguns botânicos crêem, no entanto, que o coqueiro seja natural do continente Americano e daí fora espalhado para as outras partes do mundo, devido à facilidade das sementes serem levadas pelas correntes marinhas, uma vez que a planta se situa no litoral.

Aproximadamente 85% da produção nacional de cocos é comercializada como seco, sendo a metade para uso culinário e o restante é industrializado, obtendo-se uma série de produtos como leite, sabão, óleo, etc. Cerca de 15% da produção é consumida ainda verde para extração de água, que também é industrializada (GUEDES e VILLELA, 2000).

Em 2002, a produção mundial de coco atingiu 47,8 milhões de toneladas métricas, colhidas numa área total de 10,5 milhões de hectares. Os países do continente asiático ocuparam lugar de destaque, concentrando neste ano 86% da produção. A América do Norte e Central, Oceania e África responderam por 4% cada, ficando a América do Sul responsável por apenas 2% da produção mundial (ARAGÃO, 2002).

Atualmente, estima-se que a produção anual de coco no Brasil seja de 1,2 bilhão de frutos, que são colhidos em uma área de 260 mil hectares, com predominância do coqueiro gigante, cujos frutos são colhidos secos. Entretanto, nos últimos anos, principalmente a partir da década de 90, com a conscientização da população para os

benefícios dos alimentos naturais, verificou-se um grande crescimento da exploração do coqueiro anão, visando a produção do fruto verde, para o consumo de água, que é um produto natural de excelentes qualidades nutritivas (EMBRAPA, 2006).

O coqueiro anão ocupa hoje no Brasil uma área de aproximadamente 60 mil hectares, distribuídos entre as regiões Nordeste, Norte, Sudeste e Centro Oeste e, em menor escala, na região Sul. Com a expansão dessa variedade, a cultura do coco, que era tipicamente da zona litorânea nordestina, se interiorizou e ocupou áreas não tradicionais de cultivo. Na orla das grandes cidades brasileiras são produzidas 9,6 milhões de toneladas / ano de lixo e cerca de 70% desta geração é composta por cascas de coco verde, material de difícil degradação e foco de proliferação de doenças. Em Fortaleza, nos meses de alta estação, aproximadamente 40 toneladas por dia do resíduo são gerados. (EMBRAPA, 2006).

2.3.2 Características dos Coqueiros

O coqueiro, *Cocos mucifera L.*, é uma palmeira do gênero *Cocos*, por demais conhecida na paisagem nordestina. Existem várias espécies cultivadas no Brasil, podendo-se distinguir as espécies altas, mais comuns, que chegam a atingir 40 metros de altura, e o coqueiro-anão, uma espécie de frutificação precoce e crescimento lento.

A produção do coqueiro, em solos bons ou devidamente adubados, é de 300 a 400 frutos por pé e por ano, podendo chegar a 600. Entretanto, no Brasil, os coqueiros produzem uma menor quantidade de frutos – 200 frutos por pé ao ano é a máxima produção obtida em média nas melhores lavouras do Nordeste, devido à freqüente falta de correção do solo (EMBRAPA, 2006). Em condições favoráveis de clima e solo a frutificação se dá aos 3 a 4 anos para o coqueiro anão e aos 6 a 8 anos para as espécies comuns.

Nos coqueiros baixos e de altura média, a colheita é feita usando o podão, faca recurvada, montada em vara comprida. Nos coqueiros altos o operário sobe pelo tronco com o auxílio de duas cordas de segurança (Figura 2.11) (ARAGÃO, 2002).



(a)



(b)

Figura 2.11: (a) Coqueiro Anão e (b) Coqueiro Alto (Fonte: ARAGÃO, 2002).

A cultura do coqueiro tem muitas facilidades, pode-se citar:

- O coqueiro cresce nas areias salgadas da praia, onde nenhuma outra lavoura é economicamente viável;
- É de fácil cultivo;
- Produz-se durante longo período.

2.3.3 Solo e Clima

O coqueiro é uma planta tropical, de baixas altitudes em relação ao nível do mar. Requer, portanto, clima quente e grande intensidade solar, qualquer sombreamento lhe é prejudicial (ASSIS *et al.*, 2000). Fora da faixa tropical, na orla do oceano com o clima estável marítimo, pode-se encontrar coqueirais, mas a produção em frutos é bem pequena devido à destruição da floração pelas baixas temperaturas nos meses frios.

Quanto ao solo, o coqueiro é muito exigente, necessitando de bastante cálcio e fósforo, daí a sua produção nas areias de praia, ricas em cálcio com a presença de restos de conchas marinhas.

A condição ideal para o coqueiro é ter o solo leve, permeável, silicoso ou silicoargiloso, com a camada mínima enxuta de 60 cm a 1 m. A água subterrânea,

próxima da superfície, lhe é desfavorável. Tolerar menos ainda águas estagnadas na superfície. Águas em movimento, ricas em oxigênio, lhe são benéficas e o coqueiro pode ser plantado na beira do mar e na beira dos córregos (ARAGÃO, 2002).

2.3.4 Características das Fibras de Coco

O fruto do coqueiro, o coco, é constituído por uma parte externa lisa (o exocarpo), por uma parte fibrosa e espessa (o mesocarpo); e por uma casca duríssima e lenhosa (endocarpo) (Figura 2.11). Todas essas partes envolvem a amêndoa (ESMERALDO, 2006).

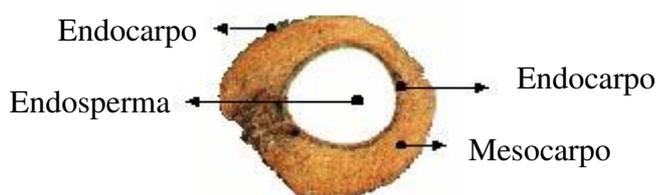


Figura 2.11: Corte longitudinal do coco (ROSA, 2002).

O mesocarpo ou casca fibrosa externa do coco é quase que totalmente destruído no Brasil, no entanto, produz fibras que poderiam ser utilizadas em diversas aplicações industriais. É formado pelas densas fibras, agregadas pelo tecido conjuntivo, fibras resistentes às águas salgadas, próprias para cordoaria naval, tapetes, escovas, etc. A fibra no comércio recebe o nome de coiro ou cairo. O mesocarpo de cocos maduros e secos fornece fibra lenhosa e dura, que dá coiro ordinário. Os cocos verdes são os que fornecem a melhor fibra celulósica.

A utilização da fibra do mesocarpo é prática antiga. Oriunda da Índia e Sri Lanka, a fibra de coco começou a ser introduzida na Europa após a chegada dos portugueses à Índia. Já nos séculos XIII e XIV os árabes usavam cordas dessa fibra e ensinaram aos navegantes ingleses o seu aproveitamento (VENKATARAMAN e RANGASWANY, 1988).

2.3.5 Vantagens na Utilização das Fibras de Coco

As fibras de coco apresentam inúmeras vantagens na sua utilização, além de ser um material ecológico e facilmente reciclável. Pertencente à família das fibras duras, tem como principais componentes a celulose e o lenho que lhe conferem elevados índices de rigidez e dureza, encontrando-se perfeitamente vocacionada para os mercados de isolamento térmico e acústico, face às suas características, que a tornam um material versátil, dada a sua resistência, durabilidade e resiliência (MURRAY, 2001).

As principais características técnicas da fibra da casca de coco que lhe garantem vantagens para a utilização industrial são as seguintes:

- Inodora;
- Resistente à umidade;
- Amplia a difusão;
- Não é atacada por roedores;
- Não apodrece;
- Não produz fungos;
- Condutividade térmica de 0,043 a 0,045 W/mk;
- Comportamento ao fogo: classe B2.

O rejeito da indústria convencional do coco maduro pode ser usado como combustível para caldeiras, ou na manufatura de cordoalha, tapetes, estofamentos e capachos. Estudos mais recentes sugerem ainda a utilização do resíduo da casca verde na agricultura intensiva (principalmente no cultivo de plantas ornamentais e hortaliças), na indústria de papel, na engenharia de alimentos para complementação alimentar humana e animal e na produção de enzimas, na indústria de construção civil e em matrizes poliméricas.

2.4 ALTERNATIVAS DE APROVEITAMENTO DO COCO

2.4.1 Produção de Coiro

Até recentemente, grande parte do coiro do comércio provinha de pequenas indústrias caseiras do Oriente, onde a mão-de-obra é barata. Não obstante, existem ainda, por mais escassas que sejam no mundo, empresas que preparam a fibra pelo processo antigo, rudimentar, que consiste nas tradicionais operações descritas por BONDAR (1954):

a) Curtimento – As cascas são imersas em tanques com água durante um período, que depende do grau de maturação do coco, variando de poucos dias a algumas semanas. A casca verdosa exige poucos dias, fornece fibra mais clara, flexível mais apreciada. Sempre são instalados dois tanques, de modo que, enquanto um está explorado, o outro se acha em curtimento. Faz-se a instalação de modo que se permita a renovação de água;

b) Pressão – A casca curtida é comprimida para expelir água e achatar-se. Nessa operação o lado externo é pisado e a fibra distendida, o que torna fácil o desfibramento. As máquinas usadas compõem-se de cilindros canelados, entre os quais a casca se esmaga;

c) Cardagem ou desfibramento – Faz-se com máquinas providas de cilindros com dentes. Numa delas, com dentes grossos, desmancha-se a casca, para tirar a maioria dos tecidos inúteis. Em outra, com dentes finos, realiza-se o processo de separação. Existem vários tipos de maquinários, com maior ou menor rendimento, conforme a importância da empresa;

d) Classificação – São dois os tipos principais da fibra de coiro: a fibra de escovas e a fibra de enchimento ou de filatura. Esta última não tem classe. A da escova é classificada segundo a cor e o comprimento. Conhecidas as cores, apreciadas no mercado, a classificação não oferece dificuldades;

e) Enfardamento – Os aparelhos para enfardamento de coiro bruto são de fácil construção. Nas pequenas indústrias o enfardamento é manual. Pode também ser associado com motor de 1 a 2 cavalos.

Indústrias de fibras na Índia e Sri Lanka têm tradição em relação com o Brasil para exportar para Europa e EUA. A venda de produtos como tapetes e outros diversos produtos artesanais e decorativos. Desde meados de 1970, as exportações começaram a declinar por causa da forte competição das fibras sintéticas. Uma gradual recuperação durante a última década pode ser justificada parcialmente pelo aumento da consciência ecológica por parte dos consumidores dos países industrializados. Além disso, a fibra de coco oferece um desempenho superior para durabilidade de tapetes, com um forte mercado nesse setor tendo em vista que a fibra de coco é ecológica e reproduz a imagem natural da fibra. Atualmente, a fibra de coco está sendo pesquisada para isolamento térmico, com resultados promissores (PANNIRSELVAM, 2000).

Nos dias atuais, toda a experiência histórica internacional da utilização da fibra de coco pode dar bons exemplos de mercadorias eco-eficientes para a produção, segundo as tecnologias hodiernamente existentes, haja vista que a geração de conhecimentos para se aprimorar-se o aproveitamento dos resíduos do coco representa outra diretriz básica para o sucesso da empreitada de se obter o máximo benefício dessa matéria-prima bruta (ROSA, 2002).

2.4.2 Biotecnologia e Agricultura

O resíduo da fibra de coco como substrato de cultivo tem sido utilizado com êxito. Sua utilização nos países mais avançados é muito recente, de forma que a primeira citação bibliográfica data de 1949. As razões de sua utilização são suas extraordinárias propriedades físicas, sua facilidade de manejo e sua característica natural (CARRIJO *et al.*, 2001).

A fibra de coco é uma matéria-prima para elaborar substratos que se destaca por elevada estabilidade e capacidade de retenção de água, assim como uma boa aeração.

As principais características químicas da fibra de coco estão contidas na Tabela 2.4.

Tabela 2.4: Características químicas da fibra de coco (CARRIJO, 2002).

Parâmetro	Valor
pH	5
Condutividade elétrica	2,15 mS/cm
Nitrogênio total (%)	0,51
Fósforo total, P ₂ O ₅ (%)	0,20
Potássio total, K ₂ O (%)	0,60
Cálcio total, CaO (%)	1,40
Magnésio total, MgO (%)	0,20
Sódio total, NaO (%)	0,187
Ferro total, Fé (%)	0,206
Celulose (%)	43,44
Lignina (%)	45,84
Pectina (%)	3,0
Hemicelulose (%)	0,25

O pH da fibra de coco é 5, o que lhe confere uma alta capacidade de intercâmbio catiônico, ocasionando um alto poder tampão em áreas irrigadas de cultivo. Não obstante, a fibra do coco verde possui uma textura micro-alveolar e uma porosidade próxima a 96%, comparável à “lã de rocha”, também utilizada para cultivo hidropônico, ou seja, sem a presença do solo e sempre em ambiente protegido, geralmente, em estufa. Concretamente para a técnica hidropônica é comprovado que as fibras de coco verde têm necessidades nutritivas inferiores aos tecidos minerais que normalmente se empregam para este tipo de cultivo. A fibra de coco utilizada como componente de substratos a base de turfa proporciona uma alta capacidade de retenção de água, uma elevada aeração do sistema radicular, assim como uma grande estabilidade dos valores de pH e condutividade elétrica do meio (CARRIJO, 2002).

A transformação da casca do coco em pó é também uma alternativa ecologicamente correta e adequada a um substrato agrícola. O pó do coco usado pela agricultura no mercado internacional chega a custar US\$ 250 por tonelada (EMBRAPA, 2006).

A exemplo do coco maduro, a casca do coco verde pode ser triturada, aproveitando o pó (rico em potássio) no solo, para reter água e como composto

orgânico. Ele também pode se transformar em alternativa de substituição da turfa (material orgânico fossilizado) que com a sua exploração vem afetando o ecossistema (ROSA, 2002).

2.4.3 Produção de Papel

O consumo de papel derivado da indústria madeireira é uma das causas de desflorestamento no mundo, o que ilustra a preocupação de encontrar alternativas não madeireiras, tal qual o retorno de resíduos agrícolas como fonte primária para a fabricação de papel.

Estima-se que os países em desenvolvimento têm um papel fundamental neste processo, pois neles se encontram disponíveis cerca de 2.500 milhões de toneladas de resíduos da produção agrícola e agroindustrial (VIDAL, 2003).

Diante desta preocupação, a utilização da casca do coco verde pode representar uma considerável porcentagem de matéria-prima para a indústria de papel e celulose, haja vista que dentro dos padrões industriais, se considera que um material vegetal é apto para a produção de papel quando apresenta uma porcentagem de 33% de celulose, componente básico na elaboração deste produto.

Conforme pesquisa desenvolvida na *Universidad del Valle*, da Colômbia, a celulose presente na casca do coco verde é cerca de 35% (VIDAL, 2003).

A fibra principal, da qual se extrai a polpa, chama-se comumente cuauá, ou *Ananas erectifolius*, e é muito curta, o que impossibilita a sua utilização como matéria-prima única para a produção de papel. Esta deve ser mesclada com outro tipo de polpa, que possua fibras compridas, que dão a resistência e flexibilidade do papel. Dessa maneira, associada com outros materiais, obtém-se uma ampla gama de papéis, com diferentes cores, texturas, espessuras e aparências (VIDAL, 2003).

Indubitavelmente, a prospecção tecnológica na indústria de papel e celulose pode produzir excelentes resultados à curto e médio prazos, quando utilizado o

aproveitamento da casca do coco verde, que atualmente causa graves problemas ambientais.

2.4.4 Engenharia de Alimentos e Zootecnia

2.4.4.1 Enriquecimento de Alimentos para a Alimentação Humana

Como o desenvolvimento tecnológico mundial avança cada vez mais no caminho dos processos biotecnológicos, devido à irreversível tendência de prevalência das políticas ambientais, a substituição de processos químicos convencionais por processos enzimáticos torna o desenvolvimento e o aprimoramento desta tecnologia de suma importância.

As enzimas são catalisadores orgânicos, responsáveis pelas milhares de reações bioquímicas envolvidas nos processos biológicos dos sistemas vivos, apresentando ampla utilização na indústria alimentícia, principalmente em processos de maceração de vegetais e frutas para a produção de néctares e purês, no processamento de produtos cárneos (tenderização), na produção de queijos, na extração e clarificação de sucos de frutas e vinho, na desengomagem de fibras naturais e na recuperação de óleos vegetais. São utilizadas também nas indústrias de papel, celulose, têxtil (biopolimento do jeans) e na produção de rações animais (COELHO, 1993; CUNHA, 1999).

Uma das alternativas para a casca de coco verde poderia ser o seu aproveitamento em processos fermentativos, como a produção de enzimas. Como a maioria dos rejeitos agroindustriais, estes materiais contêm grande quantidade de compostos como celulose, hemicelulose, pectina e outros, não havendo necessidade de grandes complementações nutricionais para o adequado desenvolvimento microbiano. Estes compostos funcionam como indutores para a produção de enzimas extracelulares, tais como celulasas, xilanases, pectinases e outras (COELHO *et al.*, 2001).

No campo da comercialização de enzimas, o Brasil é ainda consumidor de produtos importados, o que insere o potencial do coco verde como uma arma estratégica para o aproveitamento de suas fibras e como alavanca para o desenvolvimento de uma

indústria de enzimas nacional. Portanto, investir no aproveitamento da casca de coco verde para a produção de enzimas significa se inserir em um mercado de tecnologia enzimática que movimenta, anualmente, cerca de 2 bilhões de dólares. Tal montante se justifica pelo interesse gerado por processos que envolvem tecnologia de baixo custo energético, com menor impacto ambiental e que utiliza matérias-primas renováveis, adequando-se ao reaproveitamento de sub-produtos da agroindústria.

Porém, existe um alerta sobre a utilização dos cocos verdes, pois esses alimentos podem apresentar uma baixa digestibilidade e possuem freqüentemente pouca palatabilidade, razão pela qual sua ingestão voluntária é limitada. Isto dificulta o atendimento das necessidades dos animais que as consomem, quando administradas como fonte única de nutrientes. Materiais lignocelulósicos, mesmo o coco sendo verde, quando são administrados na alimentação animal, sem um prévio tratamento, proporcionam insuficientes quantidades de minerais, energia e proteínas para manter sequer o peso corporal dos animais.

Existem algumas maneiras práticas de melhorar o aproveitamento da fibra do coco verde na alimentação animal. O tratamento químico é uma delas. A técnica é de fácil manuseio, relativamente barata e bastante acessível aos produtores.

2.4.4.2 Complementação Alimentar Animal

A América Latina produz mais de 500 milhões de toneladas de subprodutos e resíduos agroindustriais. O Brasil produz mais da metade deste valor. Embora esses materiais volumosos sejam pobres em nutrientes, eles podem suprir em parte as necessidades energéticas dos animais, se previamente tratados e melhorados para este fim. Estes materiais são geralmente abundantes em fibra e ricos em lignina, entretanto o potencial de celulose que existe nestes subprodutos e resíduos e que podem servir como fonte de energia para os animais ruminantes é um fato conhecido há mais de um século (MIRANDA e BURNQUIST, 1996).

O Brasil, como país tropical, apresenta excelentes condições para a exploração de ruminantes em pastagens, porém em determinados períodos do ano, a dificuldade de

adquirir alimentos volumosos em regiões áridas e semi áridas, em épocas secas, torna-se uma árdua e difícil tarefa para muitos produtores rurais. Neste contexto, aparecem os resíduos e os subprodutos agropecuários, como as palhas, o bagaço de cana-de-açúcar e a fibra do coco verde que podem oferecer excelente opção como alimentação alternativa para os ruminantes. (MIRANDA e BURNQUIST, 1996).

Em nível mundial o coco é mais conhecido por suas propriedades oleaginosas, pois depois de extraído o óleo da polpa (copra), o resíduo (também chamado de torta) é empregado na alimentação de animais, por ser uma ração rica, com 20 por cento de proteína (SIMÕES, 2002).

Ao longo destes anos, diversas entidades governamentais e não governamentais, quer seja por iniciativa própria, ou mesmo recomendados por organizações como a ONU buscam incansavelmente soluções sistemáticas quanto ao aproveitamento destes subprodutos e resíduos na alimentação animal. Estes materiais, quando adequadamente tratados e tecnicamente orientados na alimentação animal, podem representar um enorme benefício à produção mundial (SIMÕES, 2002).

2.4.5 Engenharia de Civil e Materiais

2.4.5.1 Matrizes Poliméricas

Compósitos reforçados com fibras naturais podem ser uma alternativa viável em relação àqueles que usam fibras sintéticas, como as fibras de vidro. As fibras naturais podem conferir propriedades interessantes em materiais poliméricos, como boa rigidez dielétrica, melhor resistência ao impacto e características de isolamento térmico e acústico (SILVA, 2004).

O uso de fibras de origem natural tem sido objeto de alguns estudos, que levam em consideração a compatibilidade entre a fibra e a matriz polimérica. As fibras naturais apresentam superfícies hidrofílicas, devido à abundância dos grupamentos hidroxila, e podem produzir sistemas compatíveis com polímeros de condensação (ESMERALDO, 2006). Desta forma, a crescente exigência em nível global de produtos ecologicamente

corretos forçou a adequação de pesquisas sobre fibras de laboratórios e indústrias ao novo perfil de consumo.

Segundo SILVA (2004), na indústria de embalagens existem projetos para a utilização de fibras de coco como carga para o politereftalato de etileno (PET), podendo gerar materiais plásticos com propriedades adequadas para aplicações práticas e resultando em contribuição para a resolução de problemas ambientais reduzindo o tempo de decomposição do plástico. O PET é o mais importante plástico dentre os poliésteres e tem grande utilidade como embalagens, especialmente para bebidas, gerando, assim como o coco, grande quantidade de lixo sólido.

A indústria da borracha é receptora também de grande número de projetos envolvendo produtos ecológicos diversos, desde a utilização da fibra do coco maduro e verde na confecção de solados de calçados, até encostos e bancos de carros. Dessa forma é possível diminuir o preço do produto final, à medida que se aumenta a quantidade de utilização do resíduo do coco (ROCHA e GHELER, 2000).

A fibra de coco verde tem sido muito estudada para a utilização na composição de novos materiais (biocompostos) com polímeros tais como polietileno, poliéster, polipropileno. Neste caso, a utilização da fibra de coco para a obtenção de biocompostos é importante por ser um processo barato, natural e renovável. A maioria destes biocompostos apresenta um aumento de biodegradação. A fibra de coco verde age como um componente reforçador da matriz dos polímeros. Assim, altera as propriedades mecânicas destes compostos, tais como resistência em relação à tensão, tração e alongação na ruptura (VALLEJO, 2005).

A fibra de coco verde, em especial, necessita sofrer um processo de modificação química superficial, de forma a proporcionar maior compatibilidade com os polímeros empregados. Esses processos dependem do tipo de polímero que vai compor o biopolímero e as características finais desejadas do produto. Os exemplos de processos disponíveis para o tratamento superficial da fibra de coco são: tratamento com base, ácidos, acetilação, cianoetilação e inserções de vinil (ESMERALDO, 2006).

As modificações superficiais da fibra de coco otimizam a adesão da fibra à matriz de polímero. Os biopolímeros compostos com fibras tratadas tanto por base quanto por ácido, apresentam uma maior facilidade de biodegradação. Portanto, a produção de diversos artefatos derivados da fibra do coco verde para a indústria é tecnicamente viável, uma vez os produtos obtidos com a adição da fibra de coco maduro ou verde têm propriedades semelhantes aos compostos originais, ou até mesmo melhores.

2.4.5.2 Isolante Térmico

A fibra de coco aliada ao aglomerado de cortiça expandido, conhecido no mercado como corkoco, é um produto de alta qualidade. Sendo um excelente isolante acústico devido à absorção das baixas frequências que dificilmente são alcançados por outros materiais. O bom comportamento da cortiça em termos de estabilidade dimensional e elasticidade fazem com que o corkoco seja a melhor solução técnica e natural para a resolução de problemas de isolamento acústico e térmico (SAVASTANO, 2000).

Utilizada há várias décadas como um produto isolante em diversas situações, a fibra de coco tem hoje uma diversidade de aplicações, pelas características que apresenta. Devido às suas excepcionais performances acústicas, a fibra de coco verde e maduro contribui para uma redução substancial dos níveis sonoros, quer de impacto, quer aéreos, sendo a solução ideal para muitos dos problemas na área acústica, superando largamente os resultados obtidos com a utilização de outros materiais. A resistência, durabilidade e resiliência, convertem a fibra de coco em um material versátil e perfeitamente indicado para os mercados de isolamento, térmico e acústico.

A fibra de coco, devido às novas tecnologias, satisfaz os padrões técnicos exigidos pelo mercado, sendo utilizada como isolamento térmico e acústico, onde apresenta uma elevada eficácia. A utilização desta matéria-prima natural e renovável, existente no mundo em grandes quantidades, traz inúmeras vantagens, face ao aproveitamento de um material que se viria a perder e é transformado sem prejuízo ao

ambiente, colocando a fibra de coco na gama de produtos ecológicos (SAVASTANO, 2000).

2.4.5.3 Construção Civil

Com o surgimento dos eco-materiais para revestimentos, pinturas, e tubulações entre outros, o processo de reciclagem aplicado à construção teve um progresso considerável. Segundo SAVASTANO (2000), Internacionalmente, existem vários projetos de construções sustentáveis dentro do princípio da eco-eficiência, dos quais foram selecionados dois casos pioneiros na década de 90 para exemplificar a sua aplicação mencionados a seguir:

- Data de 1992 o projeto de 140 residências, denominado Ecopovoado Anningerblick, em Guntramsdorf, na Áustria, elaborado pelo Arquiteto Helmut Deubner, que consistiu no exemplo de uma engenhosa aplicação de ecotecnologias. Foi realizado um projeto ecológico incluindo o máximo aproveitamento dos recursos naturais disponíveis, como o uso de formas construtivas e materiais de construção ecologicamente apropriados, onde, por exemplo, o telhado em madeira, com a utilização de isolamento acústico granulado e fibra de coco, foi projetado em duas águas, orientadas para o norte, e em função dos coletores solares.
- Em Altötting, na Alemanha, em 1993, os Arquitetos Demmel, Mühlbauer e Legdobler, projetaram residências geminadas, cujos fatores determinantes do projeto foram à flexibilidade, a minimização dos custos e especialmente a sensibilidade ecológica, com a ampla utilização de materiais ecológicos na construção, além do uso de energia solar passiva e ativa.

A incorporação de fibras em materiais pouco resistentes à tração tem sido usada há milênios. No antigo testamento existe a referência sobre a impossibilidade de se fazer tijolos sem palha.

A crise energética mundial das últimas 2 décadas tem motivado o desenvolvimento de pesquisas sobre o fibro-cimento ou ou fibro-concreto devido ao fato de a fabricação de cimento exigir menor demanda de energia comparada com a necessária à fabricação do aço ou dos plásticos.

No Brasil, a utilização da fibra de coco verde na construção civil pode criar possibilidades no avanço da questão habitacional, através da redução do uso e do custo de materiais, envolvendo a definição de matrizes que inter-relacionam aspectos políticos e sócio-econômicos.

Segundo SAVASTANO (2000) a fibra de coco tem um excelente potencial para uso na construção civil através de pranchas pré-moldadas, por suas características de resistência e durabilidade, ou na utilização do fibro-cimento.

O teor das fibras brutas do coco despertou o interesse para o desenvolvimento de algumas experiências na formação de ligas com vários polímeros e materiais na construção civil como blocos de concreto, com o objetivo de aumentar a sua resistência, ao mesmo tempo que contribuiria para torná-lo mais barato (ANDRADE, 1998). Um exemplo desta situação é o trabalho desenvolvido pelo Núcleo de Informações Tecnológicas (NIT) da Universidade Federal de São Carlos (UFScar), que produziu uma placa de plástico tendo como carga resíduos de madeiras e fibras vegetais do coco .

Vários fatores justificam o desenvolvimento de pesquisas quanto à aplicação das fibras do coco no fibro-cimento e no concreto-fibra, pois além de viabilizar soluções econômicas para problemas de cobertura, equipamentos sanitários, placas e painéis, introduzindo novas alternativas no mercado de construção, o aproveitamento das fibras traria grande incentivo ao reaproveitamento do resíduo da cadeia comercial e agroindustrial do coco (ANDRADE, 1998).

2.4.5.4 Produção de Mantas e Telas para Proteção do Solo

A fibra do coco verde ou maduro pode ser empregada na área agrícola como matéria-prima para a proteção de solos, no controle da erosão e na recuperação de áreas degradadas.

A fibra, tecida em forma de manta, é um excelente material para ser usado em superfícies sujeitas à erosão provocada pela ação de chuvas ou ventos, como em taludes nas margens de rodovias e ferrovias, em áreas de reflorestamento, em parques urbanos e em qualquer área de declive acentuado ou de ressecamento rápido (VALLE, 1995).

As mantas e telas utilizadas na bem sucedida recuperação de áreas degradadas têm lenta decomposição, protegem o solo diminuindo a evaporação, aumentando a retenção de umidade, protegendo e aumentando a atividade microbiana do solo e, conseqüentemente, criando as condições favoráveis ao desenvolvimento vegetal.

As mantas podem também trazer as sementes de gramíneas incorporadas às fibras, as quais germinarão tão logo sejam fixadas no solo e regadas regularmente. Existem ainda redes orgânicas tecidas com fibra de coco, em cujas malhas é feito o plantio da espécie vegetal desejada (VALLE, 1995).

CAPÍTULO 3

CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS E PROCEDIMENTOS DE ENSAIO

Neste capítulo apresenta-se a metodologia utilizada desde a coleta do material empregado na produção dos corpos-de-prova usados na pesquisa até a caracterização destes materiais.

3.1 AGREGADOS

Os agregados utilizados nesta pesquisa foram coletados na pedreira Itaitinga (Figura 3.1), localizada no município de Itaitinga, distante 30km da capital Fortaleza, tendo sido convenientemente fracionados de modo a compor a curva granulométrica desejada para as misturas investigadas. Foi utilizado como agregado graúdo a brita $\frac{3}{4}$ ", e como agregado miúdo o pó de pedra, ambos de natureza granítica oriundos da mesma pedreira. Como material de enchimento utilizou-se o pó-de-pedra (fíler natural) e a cal hidratada (fíler artificial) a fim de melhorar a trabalhabilidade e diminuir o teor de vazios.



Figura 3.1: Vista da pedreira Itaitinga.

A caracterização dos agregados seguiu os procedimentos convencionais preconizados pelo Departamento Nacional de Infra-estrutura de Transportes (DNIT), além de alguns ensaios das especificações Superpave.

De acordo com as especificações nacionais, foram realizados para a brita ¾” os ensaios de granulometria por peneiramento (DNER-ME 083/98), abrasão Los Angeles (DNER-ME 035/98), e ensaio de adesividade (DNER-ME 078/94). Neste último obteve-se resultado satisfatório, conforme ilustrado na Figura 3.2. Para o ensaio de abrasão Los Angeles obteve-se resultado de 47%, valor abaixo do permitido segundo o DNER-ME 031/06. Porém a mesma norma admite valores superiores, no caso do material já ter apresentado desempenho satisfatório em utilização em várias obras do estado do Ceará, bem como em diversas pesquisas realizadas no Laboratório de Mecânica dos Pavimentos na Universidade Federal do Ceará (LMP/UFC).



Figura 3.2: Etapas do ensaio de adesividade realizado para a brita ¾”.

Pelas especificações Superpave foram realizados os ensaios de densidade, absorção e lamelaridade. O ensaio de densidade de agregado graúdo foi realizado seguindo a norma ASTM C 127-07 (semelhante ao procedimento descrito na norma DNER-ME 117/87). A Figura 3.3 ilustra etapas do procedimento de ensaio: (a) imersão dos agregados em água por 24h, (b) pesagem dos agregados na condição saturada superfície seca (SSS), condição em que os agregados estão com os poros preenchidos com água (após 24h de imersão), porém a superfície dos grãos deve estar seca; e (c) pesagem dos agregados imersos. Os resultados obtidos estão dispostos na Tabela 3.1.



Figura 3.3: Etapas do ensaio de densidade de agregado graúdo.

Tabela 3.1: Determinação das densidades e da absorção da brita ¾”, segundo ASTM C 127-07.

Ensaio	Resultado
Densidade real	2,654
Densidade aparente	2,651
Densidade aparente SSS	2,653
Absorção (%)	1,17

O ensaio de lamelaridade foi realizado no Cenpes/Petrobras segundo o procedimento descrito pela ASTM D 4791-99, que utiliza um paquímetro especial denominado *Caliper* (Figura 3.4). De um lado do paquímetro mede-se a maior dimensão do agregado, e do outro tenta-se passar o mesmo por uma abertura que corresponde a ½, 1/3, ou 1/5 da maior dimensão desse grão. Se o grão passa, este é considerado alongado ou achatado, caso não passe é considerado cúbico. O ensaio foi realizado separadamente para frações ¾” – ½” e ½” – 3/8”, na proporção de 1/5 e o resultado foi de 4% de partículas chatas e alongadas para ambas as frações, menor que os 10% permitidos nas especificações Superpave.



Figura 3.4: Paquímetro para determinação da lamelaridade de agregado graúdo.

Para o pó de pedra foram realizados os ensaios de granulometria por peneiramento, densidade e absorção (ASTM C 127-07), e angularidade de agregado miúdo (ASTM C 1252-98).

A norma ASTM (C 127-07), para ensaio de densidade de agregado miúdo, não requer aparelhagem sofisticada, mas demanda um tempo maior para ensaio do que os métodos do DNER (ME 084/95 e ME 194/98). Optou-se por adotar a metodologia americana, devido ao fato desta possibilitar o cálculo da densidade aparente da amostra, o que não é possível pelas normas do DNER. Abaixo segue o resumo do procedimento de ensaio adotado nessa pesquisa:

- colocar aproximadamente 1000g de material imerso em água, em um recipiente que não absorva água, por 24 ± 4 h;
- passadas 24h, retirar o excesso de água tomando cuidado para não perder parte do material fino;
- iniciar uma corrente de circulação de ar quente sobre a amostra com um secador, sempre revolvendo o material para que a secagem seja feita de forma homogênea;
- estando o material com a superfície seca saturada, encher um tronco de cone metálico padronizado com o material (o diâmetro maior deve ficar para baixo);

- preenchido o tronco de cone, inicia-se a compactação da amostra com um peso metálico, também padronizado;
- o número de golpes a ser dado na amostra é 25, com o cuidado de soltar o peso a aproximadamente 5mm da superfície superior da amostra;
- os golpes podem ser dados de uma só vez, ou de forma alternada, por exemplo, aplicam-se 10 golpes, completa-se o tronco de cone com mais material, e aplicam-se os 15 golpes restantes;
- retira-se o tronco de cone e verifica-se se houve deslizamento ou desmoronamento do material, conforme ilustrado na Figura 3.5(a). Em caso de deslizamento, evidencia-se que o material está muito seco, e em caso de nenhum deslizamento, o material ainda está muito úmido. Em qualquer um dos casos o material deve ser colocado novamente na bandeja, a fim de deixá-lo mais seco ou mais úmido, a depender do resultado obtido na tentativa anterior;



Figura 3.5: Passos para determinação da densidade de agregado miúdo (ASTM C 127-07): (a) material muito seco e (b) deslizamento ótimo da amostra.

- repete-se o procedimento do quinto ao oitavo passo até que apenas um pequeno deslizamento (em torno de 1cm) do material que se encontra nas paredes do tronco de cone, conforme ilustrado na Figura 3.5(b). Nessa condição, a amostra apresenta-se em situação de saturada superfície seca (SSS);
- pesa-se, aproximadamente, 500g da amostra com SSS (A);
- pesa-se essa amostra em um picnômetro completo com água, tendo o cuidado de tirar as bolhas de ar existentes dentro deste (B);

- retira-se todo o material contido no picnômetro e despeja-se em uma bandeja, tomando cuidado para não perder material;
- coloca-se a bandeja, juntamente com a amostra, para secar em estufa a $110 \pm 5^\circ\text{C}$, até peso constante;
- pesa-se o material seco (C);
- por fim, pesa-se o picnômetro utilizado no ensaio completo com água, até sua marca de referência (D).

O procedimento descrito pode ser melhor compreendido com as ilustrações da Figura 3.6. As densidades e a absorção da água pelo do material são calculadas conforme as Equações 3.1 à 3.4:

$$D_{real} = \frac{C}{(D + C - B)} \quad (3.1)$$

$$D_{aparente} = \frac{C}{(D + A - B)} \quad (3.2)$$

$$D_{aparente\ SSS} = \frac{A}{(D + A - B)} \quad (3.3)$$

$$Absorção\ da\ água, \% = \left(\frac{A - D}{D} \right) \times 100 \quad (3.4)$$

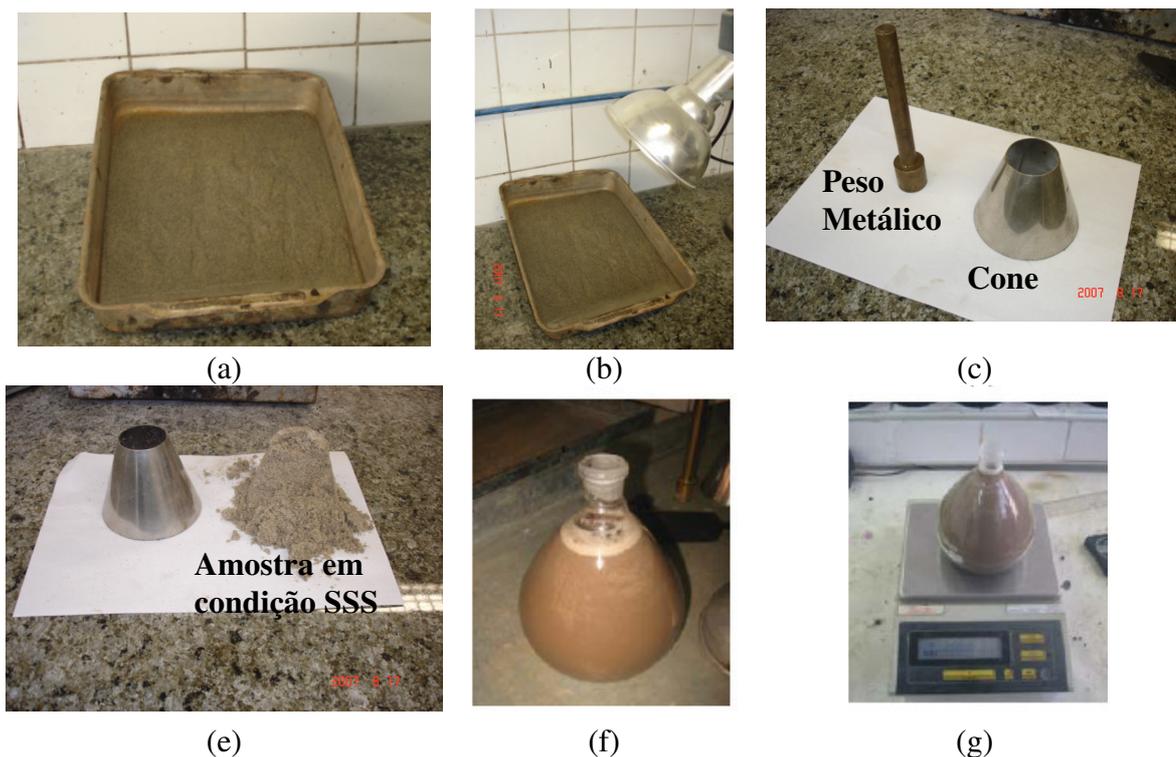


Figura 3.6: Resumo do procedimento de ensaio de densidade de agregado miúdo segundo ASTM C 127-07.

Os resultados das densidades e da absorção do pó-de-pedra são apresentados na Tabela 3.2.

Tabela 3.2: Determinação das densidades e da absorção de água pelo pó de pedra, segundo ASTM C 127-07.

Ensaio	Resultado
Densidade real	2,655
Densidade aparente	2,587
Densidade aparente SSS	2,603
Absorção de água (%)	0,6

O ensaio de angularidade de agregado miúdo (ASTM C 1252-98) avalia a forma, angularidade e textura superficial desses agregados. Essa avaliação é realizada com o valor dos vazios não compactados de uma amostra vertida de uma altura de queda estabelecida em norma dentro de um cilindro de volume conhecido (GOUVEIA e FERNANDES JR., 2002), conforme ilustrado na Figura 3.7. Os vazios medidos nos agregados são um indicador do efeito do agregado miúdo na trabalhabilidade da mistura.

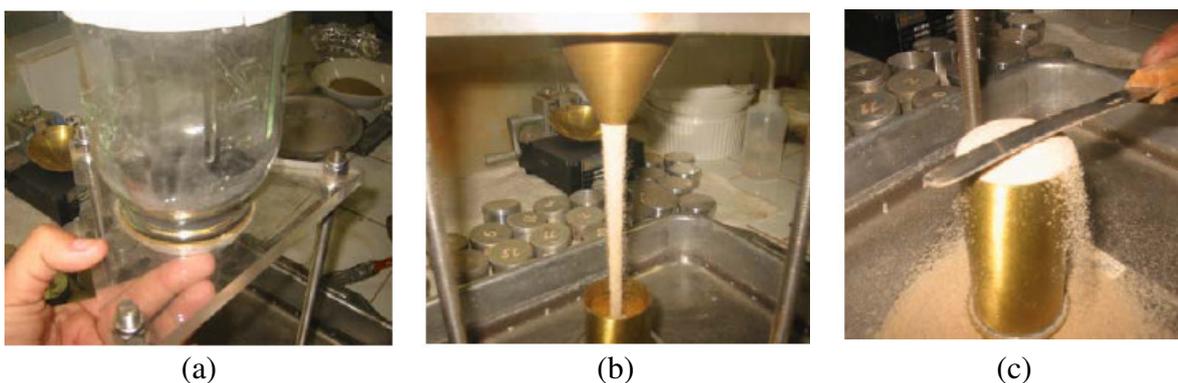


Figura 3.7: Algumas etapas do ensaio de angularidade de agregado miúdo, realizado no Laboratório de Mecânica dos Pavimentos / UFC (Fonte: VASCONCELOS, 2004).

O ensaio pode ser realizado por três métodos distintos. O método A é adotado para agregados previamente graduados, o método B para as frações isoladamente (entre a peneira N°8 e a peneira N°50) e o método C para a fração passante na peneira N°4, sendo mantida a granulometria das frações abaixo da mesma. No presente trabalho adotou-se o método B para a realização dos ensaios e os resultados obtidos para as frações N°10 – N°40, N°40 – N°80 e N°80 – N°200 foram 59,1, 56,2 e 50,1, respectivamente, todos acima do limite exigido nas especificações Superpave.

A cal hidratada, utilizada como fíler artificial nas misturas, foi fornecida pela Carbomil S.A. Algumas características do material foram obtidas e encontram-se resumidas na Tabela 3.3.

Tabela 3.3: Características da cal hidratada (Carbomil, S.A.).

Análises Físicas			
	Min	Resultado	Máx
Densidade real	-	2,78	-
Densidade aparente	-	-	-
Umidade (%)	-	2,0	2,0
Análises Químicas			
	Min (%)	Resultado (%)	Máx (%)
Perda ao fogo	23,0	25,0	25,0
Resíduo insolúvel em HCl	-	0,4	0,5
CA (OH) ₂ Disponível	90,0	90,1	-
CaO	70,0	70,6	-
MgO	-	2,6	3,5
SiO ₂	-	0,2	0,3
Óxidos totais não voláteis	88,0	97,5	-
Pureza	92,5	93,3	-

3.2 LIGANTE ASFÁLTICO

O CAP utilizado nessa pesquisa foi fornecido pela Lubrificantes do Nordeste (Lubnor/Petrobras) e é caracterizado por penetração como um CAP 50/70, de acordo com nova especificação brasileira. Este é proveniente do petróleo nacional Fazenda Alegre e atendeu a todas as especificações da Agência Nacional do Petróleo (ANP, 2005). A Tabela 3.4 apresenta as especificações convencionais para o CAP 50/70 utilizado neste trabalho para a confecção das misturas asfálticas do tipo SMA.

Tabela 3.4: Especificações convencionais do CAP 50/70 Fazenda Alegre.

Características	Unid.	Valores		Métodos	
		CAP 50 – 70		ABNT	ASTM
Penetração (100 g, 5s, 25°C)	dmm	50 – 70		NBR 6576	D 5
Ponto de amolecimento, mínimo	°C	46		NBR 6560	D 36
Viscosidade Saybolt-Furol				NBR 14950	E 102
- a 135°C, mínimo		141			
- a 150°C, mínimo	s	50			
- a 177 °C		15 – 60			
<i>ou</i>					
Viscosidade Brookfield		274		NBR	
- a 135°C, mínimo	cP	112		15184	D 4402
- a 150°C, mínimo		28 – 114			
- a 177 °C					
Índice de susceptibilidade térmica (1)		(-1,5) a (+0,7)		(1)	
Ponto de fulgor, mínimo	°C	235		NBR 11341	D 92
Solubilidade em tricloroetileno, mínimo	% massa	99,5		NBR 14855	D 2042
Ductilidade a 25° C, mínimo	cm	60		NBR 6293	D 103
Efeito do calor e do ar (RTFOT) a 163 °C, 85 min					
Variação em massa, máximo	%	0,5			D 2872
Ductilidade a 25° C, mínimo	cm	20		NBR 6293	D 113
Aumento do ponto de amolecimento, máximo	°C	8		NBR 6560	D 36
Penetração retida, mínimo	%	55		NBR 6576	D 5

Observações:

(1) O Índice de susceptibilidade térmica é obtido a partir da seguinte Equação (3.5):

$$IC = \frac{(500)(\log PEN) + (20)(T^{\circ}C)1951}{120(50)(\log PEN) + (T^{\circ}C)} \quad (3.5)$$

Onde:

(T °C): Ponto de amolecimento

PEN: penetração a 25 °C, 100g, 5 seg.

(2) A Variação em massa, em porcentagem, é definida na Equação 3.6:

$$M = \frac{M_{INICIAL} - M_{FINAL}}{M_{INICIAL}} \times 100 \quad (3.6)$$

Onde:

Minicial = massa antes do ensaio RTFOT

Mfinal = massa após o ensaio RTFOT

(3) A Penetração retida é definida na Equação 3.7:

$$PEN_{RETIDA} = \frac{PEN_{FINAL}}{PEN_{INICIAL}} \times 100 \quad (3.7)$$

Onde:

PENinicial = penetração antes do ensaio RTFOT

PENfinal = penetração após o ensaio RTFOT

Foi realizada a determinação da composição química desse ligante no Cenpes/Petrobras. A Tabela 3.5 apresenta os resultados obtidos.

Tabela 3.5: Composição química do CAP 50/70 Fazenda Alegre.

Ensaio	Método	CAP 50/70
Teor de nitrogênio total (%p/p)	-	0,65
Teor de nitrogênio básico (%p/p)	-	0,19
Fracionamento SARA (%)	IATROSCAN TLC/FID	-
Saturados		15
Aromáticos	Cromatografia em camada fina com	46
Resinas	detecção por ionização de chama	21
Asfaltenos		18
Tamanho molecular (%)		-
Alto (APM > 3700)	HP-GPC	17,5
Médio (425 < MPM < 3700)		59,5
Baixo (BPM < 425)		23,1
Carbono aromático (%)	NMR - Ressonância nuclear magnética	31,3
Teor de asfaltenos (%p/p)	IP 143	11,3

Foram determinadas também as propriedades reológicas do ligante, por meio dos parâmetros G^* , $\text{sen}\delta$ e valor-m , usando os equipamentos DSR (*Dynamic Shear Rheometer*) e BBR (*Bending Beam Rheometer*) (Figura 3.8). Com os resultados obtidos classificou-se o CAP como um PG 64-22. Este tipo de classificação refere-se ao grau de desempenho do ligante asfáltico, parâmetro utilizado na metodologia Superpave. O primeiro resultado (64) mostra a máxima temperatura, em graus Celsius, do pavimento que este material suporta sem se tornar suscetível à deformações permanentes. O segundo resultado (-22) atribui-se à mínima temperatura do pavimento que o material suporta sem apresentar susceptibilidade às trincas térmicas (SHRP, 1994; MOTTA *et al.*, 1996). Este parâmetro reporta-se apenas ao ligante asfáltico, não havendo uma garantia de que o pavimento não apresentará tais defeitos precocemente. A Tabela 3.6 apresenta o resultado das análises relativas às especificações Superpave.



(a)



(b)

Figura 3.8: Equipamentos utilizados na determinação do grau de desempenho de ligante: (a) reômetro de cisalhamento dinâmico – DSR e (b) reômetro de flexão em viga – BBR.

Tabela 3.6: Resultados das análises relativas às especificações Superpave do CAP 50/70 Fazenda Alegre realizadas no Laboratório de Mecânica dos Pavimentos/UFC.

Ensaio	CAP 50/70
Viscosidade Brookfield 135°C, 20rpm	474
Viscosidade Brookfield 150°C, 20rpm	238
Viscosidade Brookfield 175°C, 20rpm	89
Ductibilidade a 25°, cm	> 150
Cisalhamento $G^*/\text{sen}\delta$ (°C)	64
Penetração a 35°C, 100g, 5s, dmm	143
Penetração a 25°C, 100g, 5s, dmm	51
Penetração a 15°C, 100g, 5s, dmm	16
Ponto de amolecimento, °C	51,1
Viscosidade absoluta a 60°C, P	3972
PVN	-0,4
Após RTFOT	
Perda em massa, % RTFOT	0,08 (p)
Viscosidade absoluta a 60°C, P	10510
Ductibilidade a 25°, cm	> 150
Relação viscosidade após/antes RTFOT	2,7
Cisalhamento $G^*/\text{sen}\delta$ (°C)	64
Penetração a 25°C, 100g, 5s, dmm	36
Ponto de amolecimento (°C)	57
Após RTFOT/PAV	
Cisalhamento $G^*/\text{sen}\delta$ (°C)	19
Fluência – BBR (°C)	-18
Grau de Desempenho Superpave	64-22
Classificação ANP	50/70

3.3 FIBRAS

3.3.1 Fibra de celulose

Conforme já mencionado anteriormente, existe normalmente em misturas do tipo SMA a necessidade da utilização de fibras, que podem ser orgânicas, inorgânicas, ou minerais. As fibras atuam de forma a evitar a segregação das misturas, quando essas são expostas às elevadas temperaturas de usinagem e compactação, além de possibilitar que a mistura seja submetida a baixas temperaturas sem sofrer degradação (LANCHAS, 1999).

As fibras orgânicas de celulose são quimicamente inertes, de forma que não modificam o ligante. Porém, existe uma tendência das mesmas aumentarem a viscosidade do ligante evitando que este escorra do agregado antes da compactação (HORST, 2000 *apud* MOURÃO, 2003). A fibra de celulose tem ainda a vantagem de ser mais econômica em relação as fibras inorgânicas, visto ser obtida a partir de uma fonte renovável. Essas fibras podem vir em forma de *pellets*, onde parte deste é composto de fibra e parte de ligante asfáltico. As fibras quando não impregnadas com ligante não conseguem se dispersar na mistura, devido as mesmas serem fortemente unidas. Estas quando estão impregnadas com ligante apresentam, além da facilidade de dispersão, as seguintes vantagens: inodora e livre de pó, insensibilidade contra a umidade; facilidade de dosagem; e produção de mistura mais homogênea (MOURÃO, 2003). A Figura 3.9 ilustra as fibras de celulose sem ligante e quando impregnadas com ligante asfáltico.



(a)

(b)

Figura 3.9: (a) Fibra de celulose sem ligante e (b) impregnada com ligante.

As fibras de celulose utilizadas na pesquisa foram cedidas pela empresa Ecofibras, localizada no estado de São Paulo. O produto cedido é conhecido como VIATOP 66, sendo um granulado composto por 66,6% em peso de ARBOCEL ZZ 8-1 (fibra) e por 33,3% de asfalto. A Tabela 3.7 apresenta algumas características exigidas para as fibras orgânicas (celulose) para uso em misturas asfálticas tipo SMA, segundo a NCAT (1999) *apud* REIS (2002).

Tabela 3.7: Características exigidas para as fibras de celulose segundo NCAT (1999) (REIS, 2002).

Características	Fibra Orgânica
Comprimento máximo, mm	6,0
Quantidade < 150 μm (%)	63 a 77
Teor de Cinzas (%)	17 a 19
pH	6,5 a 8,5
Absorção de óleo (%)	4,0 a 6,0
Teor de umidade máximo (%)	5,0

As fibras VIATOP 66 têm forma granular cilíndrica e cor cinza. Outras características das mesmas foram fornecidas pela empresa e encontram-se resumidas na Tabela 3.8.

Tabela 3.8: Resultado de testes em amostras da fibra VIATOP 66.

Características do Granulado	Resultado
Quantidade de ARBOCEL ZZ 8-1	63-67%
Comprimento médio do granulado	2-8mm
Espessura média	4 \pm 1mm
Quantidade < 3,55mm	Max. 5%

3.3.2 Fibra de coco

As fibras de coco são constituídas de materiais lignocelulósicos, obtidos do mesocarpo (parte espessa fibrosa). O processo de desfibração do mesocarpo para obtenção da fibra de coco pode ser feito por maceração em água ou por processos mecânicos. Comparada a outras fibras vegetais, a fibra de coco tem menor percentual de celulose (36 à 43%), entretanto a quantidade de lignina (41 à 45%) é cerca de duas vezes os valores existentes para juta e o sisal, conferindo-lhe, uma maior resistência e dureza frente a outras fibras (ESMERALDO, 2006).

O processo de obtenção do pó e da fibra da casca de coco verde é feito mecanicamente com a utilização de um conjunto de equipamento desenvolvidos em parceria da Embrapa Agroindústria Tropical com a metalúrgica FORTALMAG. A produção de pó e fibra da casca de coco verde é constituído basicamente de três etapas:

a) Trituração - Nesta etapa a casca de coco é cortada e triturada por um rolo de facas fixas. Este procedimento possibilita a realização da etapa de seleção e prensagem.

b) Prensagem - A casca de coco tem alta concentração de sais em níveis tóxicos para o cultivo de várias espécies vegetais. A casca de coco verde têm 85% de umidade e a maior parte dos sais se encontra em solução. A extração desta umidade via compressão mecânica possibilita a extração conjunta dos sais. A eficiência desta etapa é de importância fundamental para a perfeita seleção do material na etapa seguinte e também para a adequação do nível de salinidade do pó obtido no processamento.

c) Seleção - Após a prensagem são separadas as fibras do pó na máquina selecionadora que é equipada com um rolo de facas fixas e uma chapa perfurada. O material é turbilhonado ao longo do eixo da máquina, o que faz com que o pó caia pela chapa perfurada e a fibra saia no fim do percurso.

Após o processamento obtém-se o pó e a fibra da casca de coco verde com um rendimento sobre a matéria prima de 15% e 7,5% respectivamente.

As fibras de coco utilizadas nesta pesquisa foram cedidas pela Embrapa no estado do Ceará (Figura 3.10). Foram utilizadas as fibras de coco com as características e propriedades apresentadas nas Tabelas 3.9 e 3.10, respectivamente.



Figura 3.10: Fibras de coco.

Tabela 3.9: Características e propriedades da fibra de coco (VALE *et al.*, 2006a).

Características do granulado	Resultados
Comprimento médio do granulado	10-20mm
Espessura média	0,1mm
Quantidade (percentual em peso da mistura)	0,5%-0,7%
PH	5,4
Condutividade Elétrica (CE)	1,8 dS/m
Capacidade de troca catiônica (CTC)	92
Relação C/N	132
Massa específica	70 g/L
Retenção de água	538 ml/L
Capacidade de aeração	45,5%
Porosidade	95,6%

3.3.2.1 Comportamento Termogravimétrico da Fibra de Coco

As técnicas termoanalíticas têm sido definidas como sendo métodos nos quais se mede a variação de uma determinada propriedade física de uma amostra em função do tempo ou da temperatura. Esta definição foi proposta por MACKENZIE (1979) e aceita pela Confederação Internacional de Análise Térmica (ICTA).

Como um caso particular das técnicas termoanalíticas, a Termogravimetria (TG) é a que acompanha a propriedade física massa da amostra em função do tempo (com a temperatura constante), ou em função da temperatura.

O tipo mais comum de experimentos empregando essa técnica é a “Termogravimetria Dinâmica”, onde se submete a amostra a uma variação constante de temperatura (controlada por um programador), em um forno, enquanto uma balança monitora sua massa. O aparelho utilizado para a técnica é chamado “Termobalança” e para que se tenham resultados, é preciso que se originem produtos de decomposição térmica voláteis, ou que ocorra incorporação de átomos ou moléculas, provenientes dos gases da atmosfera do forno, respectivamente aumentando ou diminuindo a massa da amostra.

A técnica TG é essencialmente aplicável quando se deseja acompanhar variações de massa envolvidas num experimento, sendo seus resultados fundamentalmente de ordem quantitativa.

O experimento termogravimétrico foi realizado em um módulo termogravimétrico Du Pont 951, acoplado a um termoanalisador Du Pont 9900 equipado com uma plotadora HP 7470^a, no Laboratório de Química da Universidade Federal do Ceará.

Neste experimento foram utilizadas amostras com 7,0mg, taxa de aquecimento constante de 20°C.min⁻¹ e fluxo do gás de arraste de 100°ml.min⁻¹. Os gases utilizados foram N₂ (atmosfera inerte, ou seja, sem presença de oxigênio) e ar sintético (com presença de oxigênio).

O estudo da degradação térmica da fibra de coco foi considerado com a finalidade de se investigar o efeito da temperatura na decomposição da fibra, uma vez que o produto final será submetido a condições agressivas como agitação a altas temperaturas. Essas condições são encontradas nos processos de usinagem, armazenamento e transporte do produto em carretas aquecidas. As condições térmicas utilizadas nos ensaios da termogravimétrica aqui realizados são, naturalmente,

excessivas em relação às condições as quais a fibra de coco foi submetida. Portanto, pode-se dizer que a fibra de coco apresentou uma boa resistência térmica, e que nas condições de uso em que foram misturadas ao asfalto para pavimentação estes seriam adequadas.

As curvas termogravimétricas para as fibras de coco em ar sintético e atmosfera inerte (N_2) estão ilustradas nas Figuras 3.11 e 3.12, respectivamente.

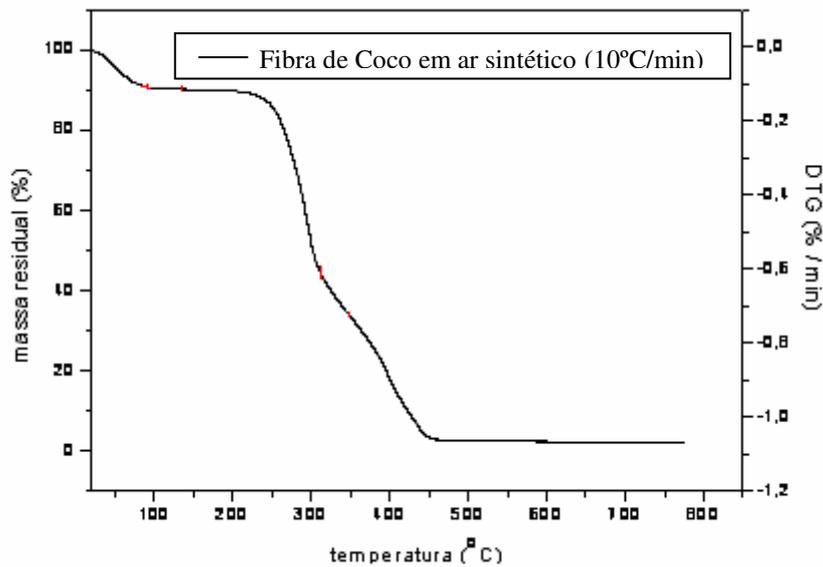


Figura 3.11: Análise Termogravimétrica TG/DTG de fibras de coco em ar sintético.

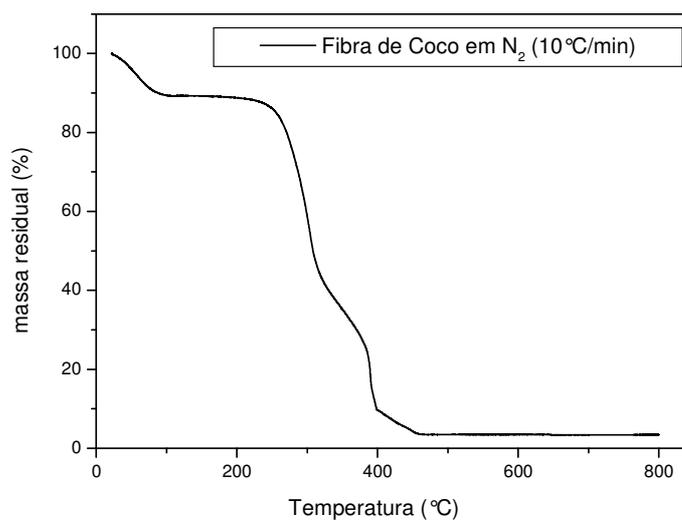


Figura 3.12: Análise Termogravimétrica TG/DTG de fibras de coco em atmosfera inerte (N_2).

Essas análises permitem a verificação do comportamento de perda de massa de fibras de coco em função da temperatura e em função da presença ou não de oxigênio.

Para a fibra de coco, o primeiro processo de perda de massa aconteceu no intervalo entre 50 – 55°C, apresentando uma maior faixa de desidratação (14 a 16% de perda de massa), indicativo da forte interação entre a água e os componentes das fibras de coco após a remoção da camada cuticular e de outras modificações químicas produzidas pelo tratamento. As curvas termogravimétricas para as fibras de coco mostraram que a temperatura de aproximadamente 250°C a fibra de coco permanece estável e não há perda de massa detectável por volatilização, tanto em atmosfera inerte como na presença de oxigênio.

CAPÍTULO 4

DOSAGEM DAS MISTURAS ASFÁLTICAS

Um dos objetivos da presente pesquisa é avaliar a viabilidade da incorporação de fibras de coco verde em misturas asfálticas do tipo SMA como alternativa à substituição da incorporação das fibras de celulose. Os procedimentos de dosagem selecionados foram o Marshall e o Superpave (Nível 1), tendo como maiores diferenças entre eles: (i) forma de determinação densidade máxima teórica; (ii) forma de compactação e (iii) envelhecimento de curto prazo, este realizado apenas nas misturas dosadas pela metodologia Superpave.

4.1 SELEÇÃO DA GRANULOMETRIA

A curva granulométrica adotada nesta pesquisa para a dosagem e confecção das misturas SMA foi de 12,5mm de tamanho máximo nominal (TMN), especificada pela norma AASHTO MP8-01 (Tabela 4.1), procurando atingir dentro da faixa especificada uma composição granulométrica que fornecesse uma maior descontinuidade. Essa seria a situação mais favorável para o escoamento do ligante sem a aplicação de fibras, fornecendo então uma melhor percepção quanto ao efeito produzido pela adição das fibras de coco verde na mistura com relação ao escoamento produzido. A curva granulométrica adotada neste trabalho é apresentada na Figura 4.1 e na Tabela 4.2.

Tabela 4.1: Especificações da AASHTO (MP8-01) para granulometria de misturas asfáltica SMA.

Abertura(mm)	9,5mm		12,5mm		19mm	
	L. Inferior	L. Superior	L.Inferior	L.Superior	L. Inferior	L.Superior
25	-	-	100	100	-	100
19,0	-	-	90	100	90	100
12,5	100	100	50	99	50	88
9,5	70	95	20	85	25	60
4,75	30	50	16	40	20	28
2,36	20	30	-	28	16	24
1,18	-	21	-	-	-	-
0,6	-	18	-	-	-	-
0,3	-	15	-	-	-	-
0,075	8	12	8	11	8	11

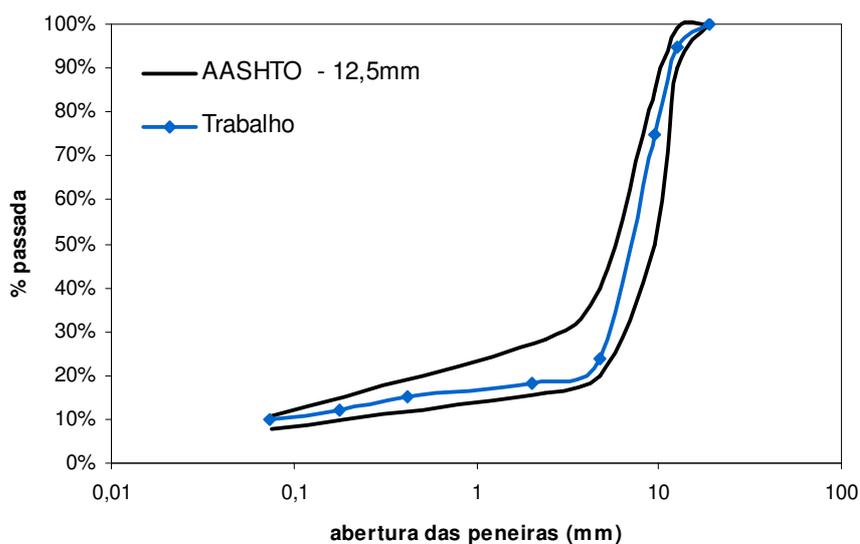


Figura 4.1: Curva granulométrica.

Tabela 4.2: Granulometria da mistura SMA 12,5mm desta pesquisa.

Peneira	Abertura (mm)	Granulometria (%)
¾"	19,1	100,0
½"	12,5	95,0
3/8"	9,5	75,0
Nº04	4,76	24,0
Nº10	2,00	18,0
Nº40	0,42	15,0
Nº80	0,18	12,0
Nº200	0,075	10,0

Vale salientar que a curva foi montada em laboratório realizando-se o peneiramento do material em toda série de peneiras da especificação do DNIT. Segundo VASCONCELOS (2004), em campo existe a dificuldade de enquadramento dos materiais na forma como são comercializados na faixa em que se deseja trabalhar.

4.2 DENSIDADE MÁXIMA TEÓRICA DAS MISTURAS

A densidade máxima teórica (DMT) é um dos parâmetros de grande relevância na determinação do teor de projeto das misturas asfálticas, visto que no Brasil este teor é geralmente baseado em parâmetros volumétricos. Apesar de existir uma definição já estabelecida de DMT, conforme mencionado por ROBERTS *et al.* (1996), existem diferentes procedimentos para o cálculo e/ou determinação desse parâmetro, conforme abordado no item 2.2.

No presente trabalho foram adotados dois procedimentos: (i) através da ponderação das densidades reais dos materiais constituintes (DMT), e (ii) através da aplicação de vácuo (ASTM D 2041), que aqui foi denominada de densidade máxima medida (DMM). A correta interpretação da norma ASTM D 2041 é que a pressão a ser aplicada é a pressão residual $\Delta = 30\text{mmHg}$ (diferença entre 760 e 730mmHg). Porém, uma pressão abaixo da exigida em norma foi de fato aplicada, devido a não capacidade da bomba usada de aplicar pressões superiores a 140mmHg. Apesar desta limitação, acredita-se que não houve incompatibilidade nos resultados. A Tabela 4.3 apresenta os resultados da DMT e da DMM obtidas para os diferentes percentuais de CAP durante as dosagens das misturas, todas determinadas por meio do mesmo procedimento.

Tabela 4.3: Resultados de DMT e DMM obtidos para as dosagens das misturas estudadas.

%CAP	Misturas asfálticas SMA 12,5mm					
	Com fibra de coco		Com fibra de celulose		Sem fibra	
	DMT	DMM	DMT	DMM	DMT	DMM
5,5	2,444	2,392	2,454	2,442	2,445	2,424
6,0	2,427	2,407	2,431	2,424	2,428	2,400
6,5	2,409	2,397	2,420	2,407	2,410	2,412
7,0	2,392	2,393	2,390	2,372	2,433	2,393

Conforme reportado por VASCONCELOS *et al.* (2003a), os valores de DMT são maiores que os valores encontrados de DMM, fato este devido à exclusão dos vazios permeáveis não preenchidos com ligante quando da determinação da DMT por meio da ponderação das densidades reais dos materiais. A utilização de materiais porosos pode levar a valores de DMM maiores que os valores obtidos de DMT, conforme reportado por CASTELO BRANCO (2004). As diferenças foram atribuídas entre distinta a forma de obtenção das densidades reais (utilizadas no cálculo da DMT) e da DMM, onde esta última é obtida pela aplicação de vácuo, onde a amostra estaria imersa em água, enquanto as densidades reais não. Segundo MARQUES (2004) *apud* CASTELO BRANCO (2004), isso levaria a menores valores de densidades reais e conseqüentemente a menores valores de DMT. A Figura 4.2 ilustra de forma mais clara os resultados apresentados na Tabela 4.3.

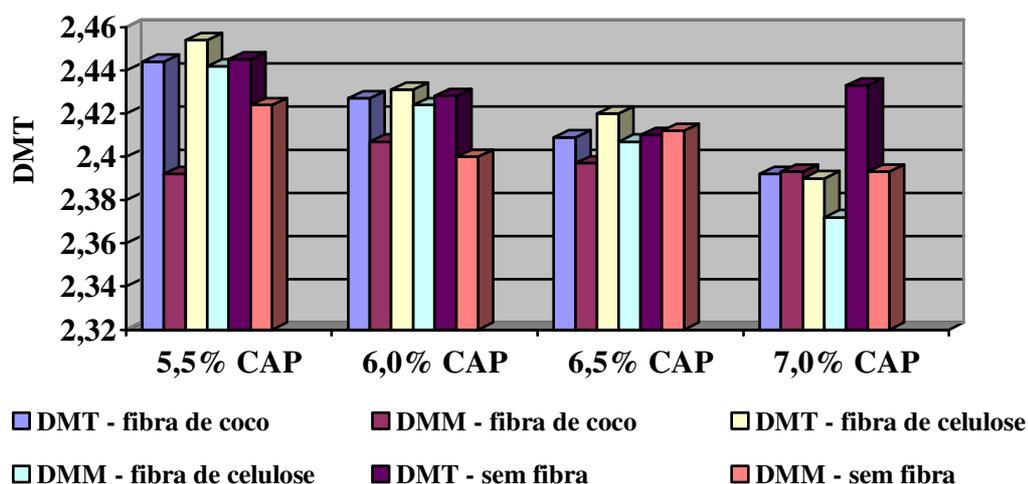


Figura 4.2: Resultados de DMT e DMM obtidos nas dosagens das misturas asfálticas SMA 12,5mm.

Observa-se dos resultados da Figura 4.2, que os valores de DMM foram mais sensíveis ao tipo de mistura que a DMT. Isso se deve provavelmente ao fato da DMT não levar em conta a interação que existe entre agregado e ligante, onde as densidades reais são contabilizadas individualmente material por material.

4.3 DETERMINAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS DE ESCORRIMENTO DE MISTURAS ASFÁLTICAS NÃO COMPACTADAS

Seguindo o método da AASHTO T 305/97 é possível estabelecer a quantidade de material escorrido (gotejado) de uma amostra de mistura asfáltica a quente não compactada, quando a mesma é mantida a temperaturas elevadas, comparáveis com aquelas usadas durante a produção, estocagem, transporte e espalhamento. Serve para determinar quando a quantidade de material escorrido para uma dada mistura asfáltica está dentro de limites aceitáveis.

Segundo a AASHTO T 305/97, o escorrimento ou gotejamento da mistura é aquela porção de material que se separa da amostra como um todo e é depositada fora da cesta de arame durante o ensaio, sendo este material drenado podendo ser CAP ou uma combinação de CAP, aditivos e/ou agregado miúdo.

O ensaio se resume em colocar certa quantidade de amostra de mistura asfáltica ($1200\text{g} \pm 200\text{g}$) em uma cesta de arame (Figura 4.3) posicionada sobre um prato. Amostra, cesta e prato são colocados conjuntamente em estufa por 60 ± 5 minutos. Ao fim deste tempo, a cesta contendo a amostra e o prato são removidos da estufa, sendo sua massa em seguida determinada. Se a temperatura da mistura baixar mais de 25°C da temperatura de ensaio, o tempo de permanência na estufa aumenta para 70 ± 5 minutos. Para cada mistura testada, as características de escorrimento devem ser determinadas em duas temperaturas diferentes, uma na temperatura do ligante para mistura e outra na temperatura do ligante para mistura mais 15°C . Desta forma é possível analisar o comportamento de misturas asfálticas SMA quando confeccionadas em usinas com variação de temperatura.



Figura 4.3: Cesta usada no ensaio de escoamento de misturas asfálticas não compactadas (AASHTO T 305/97).

Com o objetivo de que a temperatura de permanência na estufa não interferisse no resultado do ensaio, foi adotado o período de 70 minutos para todas as misturas. Foi também adotado um procedimento de mistura para que a perda de temperatura fosse igual para todas as temperaturas; adotou-se 1 minuto para mistura dos agregados e fibra, e mais 1,5 minutos para homogeneização da fibra na massa asfáltica, e logo em seguida houve a transposição da mistura para cesta. Outro ponto a ser comentado é sobre a malha padrão da cesta. A norma AASHTO T 305/97 preconiza que a malha da cesta deve ser de 6,3mm, mas foi usada uma malha de 5,5mm de abertura, que era a disponível.

Foram realizados ensaios em misturas asfálticas SMA sem fibra, com 0,3 e 0,5% de fibra de celulose (VIATOP 66), faixa recomendada por PANK (1995), e com variações de percentagens entre 0,1 a 0,7% de fibra de coco. Para cada percentagem de fibra, o ensaio foi realizado na temperatura de 165°C, temperatura de mistura do ligante CAP 50/70, e em 180°C, temperatura do ligante mais 15°C. São apresentados na Tabela 4.4 os resultados dos ensaios de escoamento; e nas Figuras 4.4(a) à 4.4(f), fotos do escoamento para os vários teores de fibra.



165 °C



180 °C

(a) Escorrimento sem fibra.



165 °C



180 °C

(b) Escorrimento com 0,3% de fibra de coco.



165 °C



180 °C

(c) Escorrimento com 0,5% de fibra de coco.



165 °C



180 °C

(d) Escorrimento com 0,7% de fibra de coco.



165 °C



180 °C

(e) Escorrimento com 0,3% de fibra de celulose.

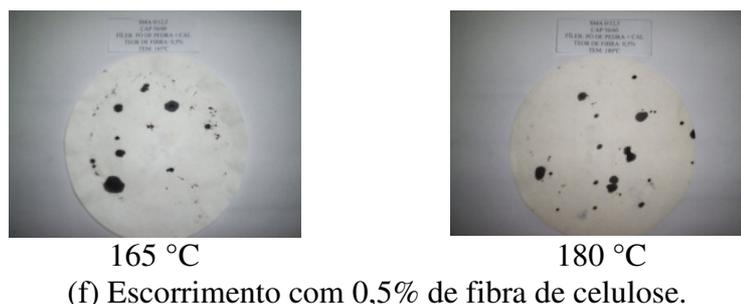


Figura 4.4: Ensaio de escorrimento realizado nas misturas asfálticas SMA.

Tabela 4.4: Resultado do ensaio de escorrimento (VALE *et al.*, 2006b).

Fibra	Teor (%)	Escorrimento (%)	
		T = 165° C	T = 180° C
Sem	0,0	1,06	0,70
Coco	0,3	0,31	0,30
	0,5	0,08	0,25
	0,7	0,04	0,09
Celulose	0,3	0,01	0,03
	0,5	0,01	0,02

Segundo VALE *et al.* (2006b), o uso de fibras é essencial em misturas do tipo SMA com CAP 50/70 objetivando evitar o escorrimento, que deve ser no máximo 0,3%. Os resultados mostram que esta exigência é atendida com a incorporação de fibras de coco variando entre 0,5 e 0,7%. O teor de fibra utilizado na mistura para confecção dos corpos-de-provas destinados aos ensaios mecânicos foi de 0,5% para a fibra de coco e 0,3% para a fibra de celulose, pois atenderam as exigências da norma.

4.4 DOSAGEM MARSHALL

O método Marshall ainda é o procedimento mais usado para determinação do teor de ligante no Brasil. A norma DNER-ME 43-64 recomenda o esforço de compactação de 50 golpes por face para pressão de pneu até 7kgf/cm² e de 75 golpes por face para pressão entre 7 e 14kgf/cm². Não existe, porém, nenhuma recomendação na norma com relação à frequência de aplicação dos golpes, da mesma forma que não existe na norma ASTM D 5581-06. Existe crítica de alguns autores com relação à dispersão dos resultados obtidos para teor de projeto de ligante asfáltico, apesar da

existência de normas padronizando o método Marshall (COELHO e SÓRIA, 1995; FRANKEN *et al.*, 1997 *apud* MOTTA, 1998). Pode ainda ser observada diferença de resultados quando da adoção de compactação automática, ou manual, conforme reportado por KANDHAL e KOEHLER (1985) e ALDIGUERI *et al.* (2001).

O procedimento de dosagem Marshall pode apresentar diferentes métodos para escolha do teor de projeto de ligante asfáltico. Segundo NAPA (1982), a escolha do teor de ligante asfáltico é baseado somente no volume de vazios (Vv), correspondente a 4%, ou o Vv correspondente à média das especificações. ROBERTS *et al.* (1996) baseiam essa escolha na estabilidade Marshall, peso específico e Vv. Nesse caso, o teor de projeto é uma média de três teores, correspondentes aos teores associados à máxima estabilidade, ao peso específico máximo da amostra compactada e a um Vv de 4% (ou média das especificações).

A dosagem das misturas foi executada com as cinco granulometrias definidas no item 4.1, porém, seguiu o procedimento descrito em SOARES *et al.* (2000). Este é o método convencionalmente adotado pela 3ª Unidade de Infra-estrutura Terrestre (UNIT) do Departamento Nacional de Infra-estrutura Terrestre (DNIT) e é baseado em dois parâmetros volumétricos: Vv e relação betume-vazios (RBV), determinados pelas equações abaixo.

$$V_v = \frac{DMT - D_a}{DMT} \times 100\% \quad (4.1)$$

$$RBV = \frac{VCB}{VAM} \quad (4.2)$$

Em que,

DMT: Densidade Máxima Teórica;

D_a: Densidade Aparente da Mistura Compactada;

VCB: Vazios Cheios com Betume; e

VAM: Vazios no Agregado Mineral.

$$D_a = \frac{P_{ar}}{P_{ar} - P_{imerso}} \quad (4.3)$$

$$VCB = \frac{D_a \times \%_{CAP}}{D_{CAP}} \quad (4.4)$$

$$VAM = V_v + VCB \quad (4.5)$$

Em que,

D_a : Densidade Aparente da Mistura Compactada;

P_{ar} : Peso do corpo-de-prova no ar;

P_{imerso} : Peso do corpo-de-prova imerso em água;

$\%_{CAP}$: Porcentagem de CAP na mistura.

O procedimento descrito em SOARES *et al.* (2000) consta da moldagem de corpos-de-prova (CP's) em cinco diferentes teores de ligante asfáltico. Desses CP's são determinados o Vv e o RBV de forma a traçar um gráfico onde a abscissa é dada pelo percentual de CAP, a ordenada y_1 pelo Vv e a ordenada y_2 pelo RBV, conforme mostrado na Figura 4.5. O teor de projeto (TP) é dado pela média dos dois valores centrais de CAP, obtidos pelas retas verticais provenientes dos pontos em que estas interceptam as especificações de Vv e RBV indicadas na Figura 4.5 pelas linhas pontilhadas.

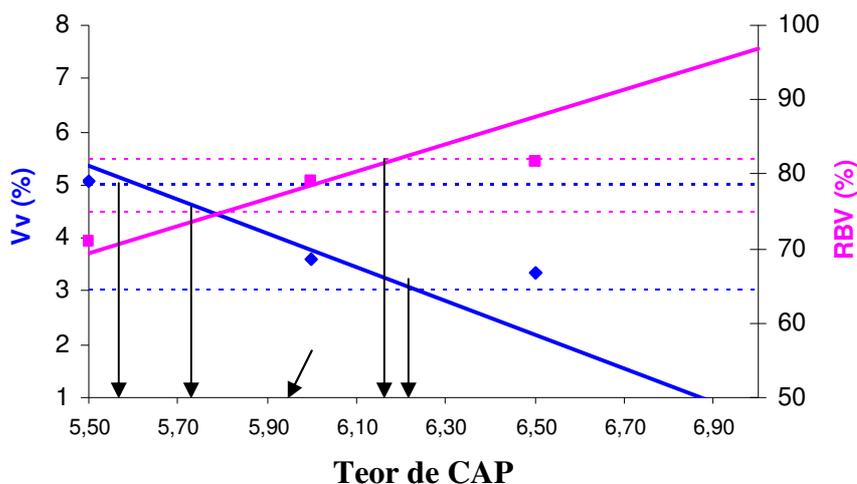


Figura 4.5: Exemplo de obtenção do teor de projeto.

Para este trabalho convencionou-se chamar esse procedimento de Marshall, devido basicamente ao processo de compactação, apesar de este não contemplar a determinação da estabilidade e da fluência, conforme especificado na norma DNER ME 043/95. Tanto o número de golpes (dosagem Marshall) como o número de giros (dosagem Superpave) foram escolhidos a fim de simular a passagem de tráfego médio a pesado.

A temperatura do ligante para a realização da mistura ficou entre 155 e 162°C e a temperatura de compactação entre 144 e 149°C. Essas temperaturas foram determinadas a partir do gráfico viscosidade × temperatura do CAP utilizado (ASTM D 4402-06) (Figura 4.6).

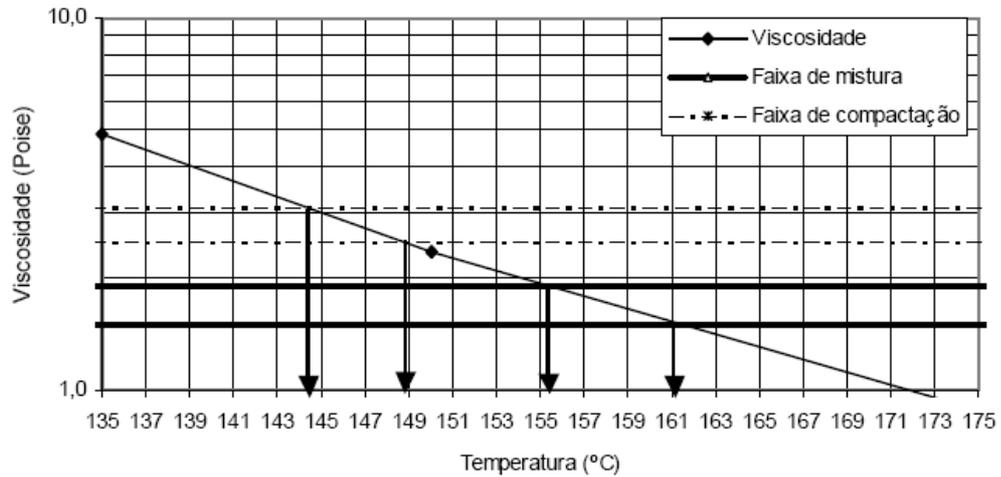


Figura 4.6: Gráfico Viscosidade (Poise) × Temperatura para o CAP 50/70 Fazenda Alegre.

A Figura 4.7 ilustra os passos adotados durante a compactação das amostras segundo a metodologia Marshall: 4.7(a) peso do ligante; 4.7(b) mistura de agregados, ligante e fibras; 4.7(c) colocação da mistura no molde; 4.7(d) compactação da mistura; 4.7(e) extração do corpo-de-prova do molde; e 4.7(f) medidas das dimensões do corpo-de-prova.



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)

Figura 4.7: Passos para compactação Marshall das misturas SMA com fibra de coco.

4.4.1 Misturas SMA

As misturas SMA, porém, por apresentarem uma granulometria descontínua com elevado percentual de agregado graúdo, necessitam de cuidados durante a compactação das amostras. Foi adotado 50 golpes por face, com o intuito de evitar a degradação dos agregados durante o processo de compactação, visto que esse é o procedimento normalmente adotado para misturas SMA. Decidiu-se pela não adoção do envelhecimento de curto prazo.

Com relação à DMT, essa foi determinada de duas formas: (i) por meio da ponderação das densidades reais dos materiais constituintes, conforme abordado no item 2.4.1; (ii) por meio do procedimento descrito na norma ASTM D 2041, nesta pesquisa denominada densidade máxima medida (DMM), conforme adotado por outros autores (MOURÃO, 2003; CASTELO BRANCO, 2004). O procedimento normalmente utilizado nas universidades, órgão rodoviários e empreiteiras brasileiras é através da ponderação das densidades, muitas vezes devido à falta da aparelhagem necessária para aplicação do vácuo requerido no procedimento ASTM. No estudo realizado por

VASCONCELOS *et al.* (2003b), porém, é feita uma discussão sobre o conceito de DMT, onde, como conclusão, os autores sugerem a adoção do procedimento americano, DMM. Dessa forma, optou-se por verificar a influência do uso da DMT ou DMM na dosagem das misturas estudadas.

A densidade aparente (D_a) do CP compactado também é determinada de forma diferente quando seguida especificação do DNIT (DNER ME 117/87), quando comparada à especificação americana (ASTM D 2726-05). De acordo com a norma brasileira, a D_a é determinada segundo a Equação 4.6, e quando seguida a norma americana, esta (D_a') é determinada conforme na Equação 4.7.

$$D_a = \frac{P_{ar}}{P_{ar} - P_{imerso}} \quad (4.6)$$

$$D_a' = \frac{P_{ar}}{P_{SSS} - P_{imerso}} \quad (4.7)$$

Observa-se das equações, que no procedimento americano é introduzido o P_{SSS} , que é o peso do CP em condição de saturação, porém com a superfície seca. O conceito de superfície seca saturada (SSS), conforme abordado no Capítulo 3, não é considerado no procedimento brasileiro, de forma que se optou por avaliar também a influência da forma de determinação da D_a na dosagem das misturas estudadas. A condição de SSS também foi discutida no item 3.1, quando da obtenção das densidades dos agregados. As misturas foram dosadas para V_v variando entre 3 e 5% e RBV variando entre 75 e 82%. A Tabela 4.5 e a Figura 4.8 apresentam os valores de teor de projeto obtidos para as três misturas, quando variados: (i) DMT e (ii) D_a .

Tabela 4.5: Teores de projeto obtidos para as misturas asfálticas SMA 12,5mm – Marshall.

	Misturas asfálticas SMA 12,5mm					
	Com fibra de coco		Com fibra de celulose		Sem fibra	
	D_a (DNER)	D_a' (ASTM)	D_a (DNER)	D_a' (ASTM)	D_a (DNER)	D_a' (ASTM)
DMT	6,1%	6,4%	5,8%	5,9%	6,2%	6,2%
DMM	6,0%	6,2%	5,9%	6,0%	6,0%	6,0%

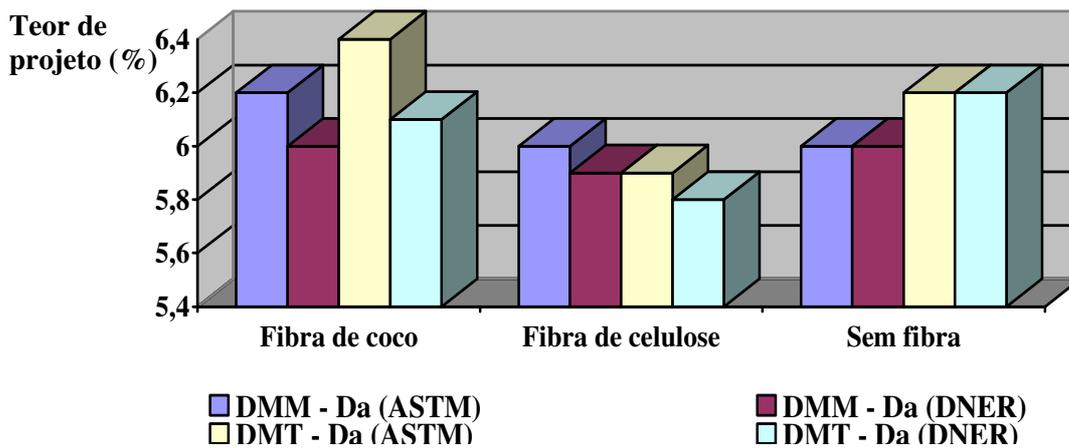


Figura 4.8: Teores de projeto obtidos para as misturas SMA 12,5mm – Marshall.

Dos doze teores de projeto encontrados, apenas três seguiram para a etapa de caracterização mecânica. Estes foram os referentes às três misturas analisadas, quando considerando a DMM e o método ASTM para determinação da D_a (valores em negrito na Tabela 4.4).

A etapa seguinte foi de avaliação das recomendações existentes nos procedimentos europeus (EAPA, 1998) e americanos (NAPA, 2002), a fim de verificar se existia divergência entre os diversos países no que diz respeito aos requisitos volumétricos exigidos durante os procedimentos de dosagem. A Tabela 4.6 ilustra de forma resumida essas exigências nos países europeus, bem como nos EUA, aplicadas a misturas com tamanho máximo nominal (TMN) entre aproximadamente 9,5 e 12,5mm.

Tabela 4.6: Exigências de alguns parâmetros volumétricos adotadas em países europeus (EAPA, 1998) e nos EUA (NAPA, 2002).

País	Parâmetros		
	Teor de ligante (%)	Vv (%)	RBV (%)
Alemanha	> 6,5	3,0 – 4,0	-
Dinamarca	-	1,5 – 4,0	78 – 93
EUA	> 6,0	4,0	-
Holanda	7,0	4,0 – 5,0	-
Hungria	6,0 – 7,5	2,5 – 4,5	-
Itália	5,5 – 7,0	1,0 – 4,0	-
Noruega	6,3	1,0 – 5,0	70 – 90
Portugal	> 5,0	3,0 – 6,0	-
Reino Unido	6,5 – 7,0	-	-
República Tcheca	6,5 – 7,5	3,0 – 4,5	-
Suécia	5,7 – 7,6	2,7 – 5,4	-

É possível observar da Tabela 4.6, que existe uma grande variação no que diz respeito principalmente ao parâmetro Vv (1,0 – 6,0%), que pode levar também a um comportamento mecânico bastante distinto.

4.5 DOSAGEM SUPERPAVE

A maior diferença entre os dois procedimentos de dosagem analisados é a forma de compactação. Enquanto na dosagem Marshall, a compactação é feita por impacto (golpes), na dosagem Superpave é realizada por amassamento (giros). Para este trabalho, utilizou-se o compactador giratório existente no LMP/UFC, um Troxler modelo 4140, indicado na Figura 4.9. A Tabela 4.7 apresenta os valores de número de giros inicial ($N_{inicial}$), de projeto ($N_{projeto}$) e máximo ($N_{máximo}$) correspondente ao volume de tráfego. Os esforços de compactação em $N_{inicial}$ e $N_{máximo}$ são usados para avaliar a compatibilidade da mistura, enquanto o $N_{projeto}$ é utilizado para selecionar o teor de ligante de projeto (ASPHALT INSTITUTE, 2001).



Figura 4.9: Compactador giratório LMP/DET/UFC – Troxler 4140.

Tabela 4.7: Número de giros especificados na norma de dosagem Superpave (BERNUCCI *et al.*, 2006).

Parâmetros de compactação			Tráfego
N inicial	N projeto	N máximo	
	50	75	Muito leve (local)
7	75	115	Médio (rodovias coletoras)
8	100	160	Médio a alto (vias principais, rodovias rurais)
9	125	205	Alto volume de tráfego (interestaduais, muito pesado)

O compactador utilizado tem as seguintes características:

- ângulo de giro de $1,25 \pm 0,2^\circ$;
- rotação de 30 giros por minuto; e
- pressão vertical durante os giros de 600kPa.

As amostras foram compactadas com cilindro de 100mm a fim de possibilitar uma comparação com os resultados obtidos no procedimento Marshall, sem trazer como variável o tamanho do molde.

Para tráfego de médio a pesado, conforme estipulado para o projeto dessas misturas, seria necessária a realização de uma dosagem Superpave Nível 2, conforme abordado em ASPHALT INSTITUTE (2001). Porém, pela impossibilidade de adoção da mesma, devido à falta de parte dos equipamentos necessários, optou-se por realizar

essas dosagens apenas baseadas nos parâmetros volumétricos, conforme previsto para o Nível 1.

A Figura 4.10 ilustra os passos adotados durante a compactação das amostras segundo a metodologia Superpave: 4.10(a) peso do ligante; 4.10(b) mistura de agregados, ligante e fibras; 4.10(c) envelhecimento de curto prazo (2h) em estufa na temperatura de compactação; 4.10(d) preparação do molde para recebimento da mistura; 4.10(e) colocação da mistura no molde; 4.10(f) encaixe do molde com a mistura no compactador giratório; 4.10(g) início da compactação; e 4.10(h) desforma do CP.

A dosagem Superpave de misturas asfálticas segue a metodologia descrita em ASPHALT INSTITUTE (2001). Durante o procedimento de compactação dos CP's (através do SGC), tem-se o acompanhamento das alturas, e conseqüentemente das densidades, durante o processo de compactação da amostra. Essas alturas irão possibilitar a dosagem da mistura através do cálculo dos parâmetros volumétricos para N_{inicial} , N_{projeto} e $N_{\text{máximo}}$.



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)



(g)



(h)

Figura 4.10: Passos para compactação Superpave das misturas SMA com fibra de coco.

4.5.1 Misturas SMA

Para as misturas SMA foi adotado o procedimento descrito na norma AASHTO PP41-01. Porém, foi também verificada a sensibilidade do procedimento de dosagem às variações da forma de determinação da DMT e da D_a . Nas misturas SMA não são verificados os critérios volumétricos para $N_{inicial}$ e $N_{máximo}$. Segundo a norma mencionada, a compactação das misturas deve ser realizada para $N_{projeto}$ de 100 giros quando a abrasão dos agregados for inferior a 30%. Para o caso de agregados com abrasão maior que 30%, como o adotado na pesquisa, adota-se 75 giros como $N_{projeto}$.

A Tabela 4.8 e a Figura 4.11 apresentam o resumo dos teores de projeto obtidos para as misturas SMA dosadas pela metodologia Superpave, levando em consideração as variações da DMT e da D_a anteriormente explanadas.

Tabela 4.8: Teores de projeto obtidos para as misturas asfálticas SMA 12,5mm – Superpave.

	Misturas asfálticas SMA 12,5mm					
	Com fibra de coco		Com fibra de celulose		Sem fibra	
	D_a (DNER)	D_a (ASTM)	D_a (DNER)	D_a (ASTM)	D_a (DNER)	D_a (ASTM)
DMT	6,8%	7,0%	6,1%	6,4%	5,9%	6,3%
DMM	6,2%	6,3%	6,0%	6,0%	5,9%	6,0%

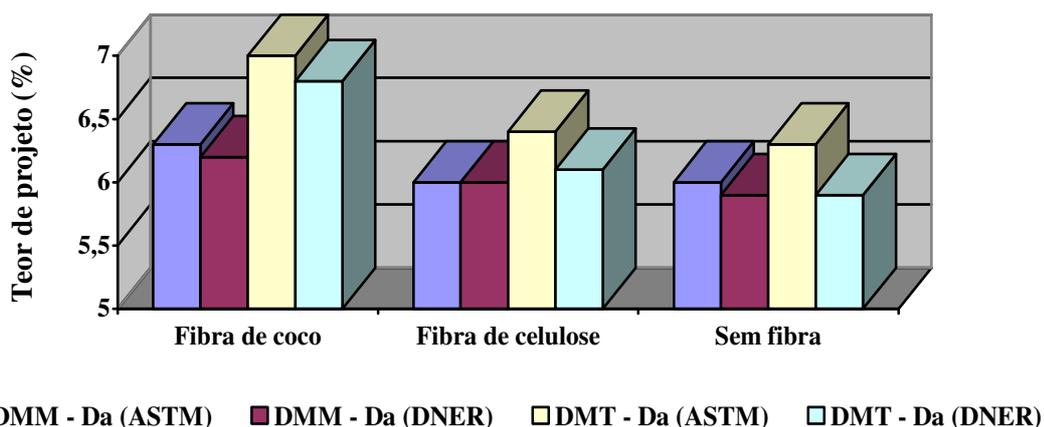


Figura 4.11: Teor de projeto obtido para as misturas asfálticas SMA 12,5mm – Superpave.

As misturas asfálticas SMA 12,5mm com fibra de coco seguindo a metodologia Marshall e Superpave apresentaram maior teor de projeto para todas as variações realizadas, possivelmente por apresentar em maior quantidade de fibra na mistura.

As diferenças de teores de projeto obtidas para as misturas Superpave não se assemelharam às diferenças obtidas para as misturas Marshall quando variadas: a forma de determinação da DMT e da D_a .

4.6 COMPARAÇÃO DAS DOSAGENS MARSHALL E SUPERPAVE

Conforme observado na Tabela 4.9, os valores de teor de projeto foram semelhantes para as dosagens Superpave, em relação às dosagens Marshall para todas as misturas, fato que não era esperado. Segundo VASCONCELOS (2004), durante a década de 80, muitos engenheiros americanos passaram a questionar o teor de ligante obtido durante a dosagem Marshall. Eles atribuíram ao excesso de ligante a responsabilidade pelas deformações permanentes nas rodovias americanas, de forma que se passou a acreditar que misturas asfálticas dosadas pela metodologia Marshall apresentavam teores de projetos superiores aos encontrados seguindo a metodologia Superpave.

Tabela 4.9: Parâmetros volumétricos dos CP's moldados no teor de projeto.

	Misturas asfálticas SMA					
	Com fibra de coco		Com fibra de celulose		Sem fibra	
	Marshall	Superpave	Marshall	Superpave	Marshall	Superpave
D_a	2,285	2,295	2,338	2,345	2,340	2,349
V_v (%)	4,4	4,0	3,8	3,6	3,9	3,5
VCB (%)	14,0	14,1	13,7	13,7	13,4	13,5
VAM (%)	18,4	18,1	17,5	17,3	17,4	17,0
RBV (%)	76,1	77,7	78,2	79,4	77,5	79,2
TP (%)	6,3	6,2	6,0	6,0	6,0	6,0

Os CP's dosados pela metodologia Marshall apresentaram maiores índices de volume de vazios quando comparados com os moldados na metodologia Superpave. Nas misturas asfálticas SMA sem fibra e com fibra de celulose não houve variação do teor de projeto, apesar de terem sido moldados em diferentes metodologias. Do ponto

de vista prático, o mesmo pode ser dito com relação às misturas asfálticas SMA com fibra de coco onde houve uma variação do teor de projeto.

A influência dos parâmetros abordados nesse estudo no teor de projeto das misturas asfálticas estudadas também foi analisada (Tabela 4.10). Os quatro parâmetros foram avaliados isoladamente, sendo abordados como única variável entre os procedimentos de dosagem. As setas para cima indicam que aquela variação provoca um aumento do teor de projeto, e as setas para baixo o oposto. Dessa forma, o aumento no teor de projeto atribuído às dosagens Marshall é influência da forma de determinação da DMT, bem como do processo de compactação. Vale ressaltar também, a importância da equivalência entre o número de golpes adotados na dosagem Marshall e o número de giros na dosagem Superpave, antes de se proceder a comparação entre os dois procedimentos.

Tabela 4.10: Influência de alguns fatores no teor de projeto de misturas asfálticas.

Parâmetros	Variações	Teor de projeto
DMT	Fórmula (DMT)	↑
	Vácuo (DMM)	↓
D _a	DNER	↑
	ASTM	↓
Envelhecimento de curto prazo	Sem envelhecimento	↑
	2h à temperatura de compactação	↓
Compactação	Impacto (Marshall)	↑
	Amassamento (Superpave)	↓

A Figura 4.12 indica as variações no teor de projeto para cada uma das misturas estudadas, onde é possível observar que o maior teor (para todas as misturas) foi obtido quando adotado a DMT pela ponderação das densidades dos materiais constituintes, compactação por amassamento (Superpave) e D_a obtida pelo procedimento americano. Enquanto que o menor teor foi obtido quando adotado DMM (ASTM D 2041), compactação por amassamento (Superpave) e D_a obtida pelo procedimento descrito nas especificações do DNER. Diante dos resultados obtidos é possível concluir que o teor ótimo de projeto de uma mistura asfáltica depende dos vários procedimentos de ensaio a serem adotados durante a dosagem, de forma que uma combinação desses procedimentos pode levar a teores distintos do teor ótimo de projeto.

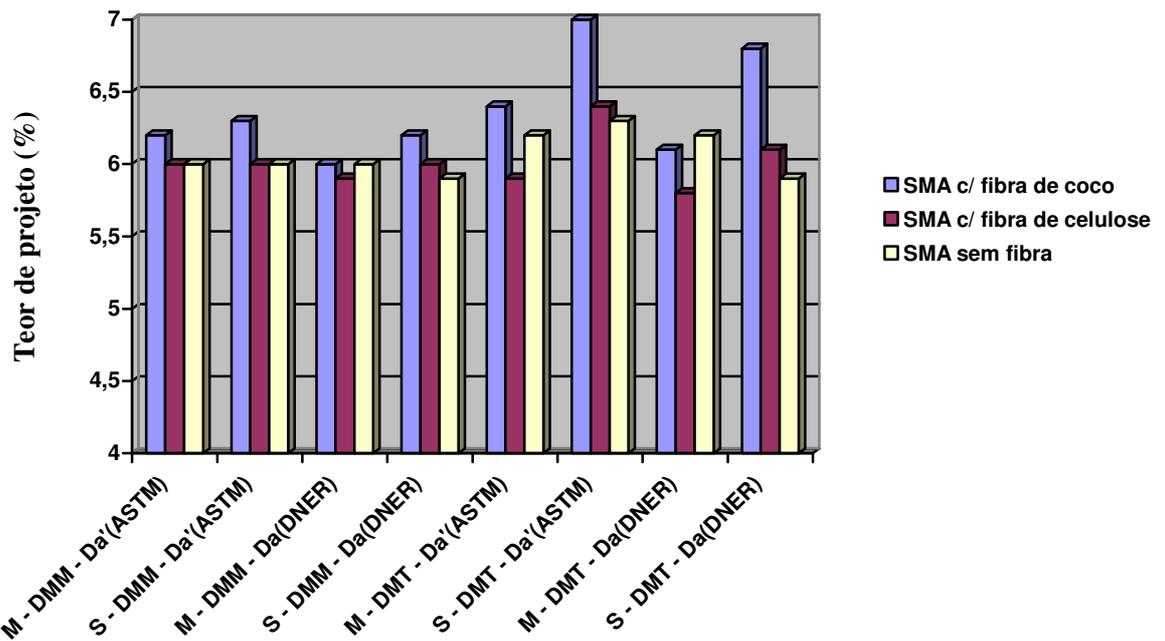


Figura 4.12: Resumo das dosagens das três misturas asfálticas SMA 12,5mm.

4.7 ABSORÇÃO DE ASFALTO

Absorção pode ser definida como a fixação de uma substância, líquida ou gasosa, no interior da massa de outra substância, geralmente sólida, e resultante de um conjunto complexo de fenômenos de capilaridade, atrações eletrostáticas, reações químicas etc. (FERREIRA, 1999). A absorção de asfalto pelo agregado é um fenômeno de alta complexidade, influenciado por características do agregado e do asfalto, assim como por fatores externos.

Segundo GOUVEIA (2006), a consequência direta do fenômeno da absorção é a diminuição do filme de asfalto que envolve as partículas do agregado, ou seja, a diminuição da quantidade de asfalto efetivo na mistura. Essa diminuição torna a mistura mais suscetível às tensões causadas pelo tráfego e às intempéries, influenciando também o endurecimento e o envelhecimento do asfalto prematuramente e, conseqüentemente, passa a ser uma causa importante para o surgimento de vários problemas no pavimento (GOUVEIA, 2006).

Durante o projeto de misturas, a absorção de asfalto deve ser considerada, pois a maioria dos agregados apresenta algum grau de absorção. Caso não seja verificada a

taxa de ligante absorvida pelo agregado, certamente serão produzidas misturas com teores de asfalto efetivos inferiores àqueles projetados, pois parte do asfalto adicionado durante a produção dessas misturas será absorvido, portanto, não estará mais disponível para agir como ligante.

4.7.1 Métodos de Determinação da Absorção

A maioria dos pesquisadores tem avaliado a absorção dos agregados através de correlações com a absorção de outros líquidos, geralmente a água e o querosene.

RICE (1953) desenvolveu um método de determinação indireta da absorção de asfalto da densidade máxima medida (DMM) das misturas. A limitação desse método é a necessidade de total cobertura das partículas do agregado pela película de asfalto, pois se as partículas não estiverem completamente envolvidas pelo asfalto, no momento da saturação por vácuo parcial, estas passam a absorver água, comprometendo os resultados do ensaio. Entretanto, RICE (1953) propôs também um procedimento suplementar para correção desse problema, caso venha a ocorrer, descrito na norma ASTM D 2041.

CASTRO NETO (1996) propôs outro método de determinação indireta da absorção de asfalto, também através da densidade máxima medida, no entanto, empregando querosene, ao invés do vácuo parcial proposto por RICE (1953), para expulsar os vazios de ar das misturas. Esse método é bastante promissor para utilização em campo, por ser rápido, com vantagens sobre o método Rice, que necessita da aplicação de vácuo para a retirada de vazios de ar da mistura, o que torna complicada a sua prática em obras. Segundo VASCONCELOS *et al.* (2003b), os resultados obtidos, tanto através do método Rice como através do método do Querosene, produzem praticamente os mesmos valores de DMM, apesar do querosene ser um solvente natural do asfalto.

Atualmente, o Superpave estabelece o uso do Método Rice para a determinação da DMM das misturas, por ser um ensaio de execução relativamente rápida, realístico e apropriado também para a determinação da absorção de asfalto.

4.7.1.1 Determinação da Taxa de Absorção de Asfalto

Conhecida a DMM da mistura, pode-se calcular a densidade efetiva do agregado através da Equação 4.8:

$$\rho_{ef} = \frac{1 - P_b}{\frac{1}{DMM} - \frac{P_b}{\rho_b}} \quad (4.8)$$

Onde:

ρ_{ef} = Densidade efetiva do agregado;

P_b = Porcentagem de asfalto na mistura;

ρ_b = Densidade do asfalto.

E, sendo conhecidas as densidades efetiva e aparente do agregado e a densidade do asfalto, pode-se calcular a taxa de absorção através da Equação 4.9:

$$A_{abs} = 100 \times \frac{\rho_{ef} - \rho_{ap}}{\rho_{ef} \times \rho_{ap}} \times \rho_b \quad (4.9)$$

Onde:

A_{abs} = Porcentagem de asfalto absorvido por massa de agregado;

ρ_{ef} = Densidade efetiva do agregado;

ρ_{ap} = Densidade aparente do agregado;

ρ_b = Densidade do asfalto.

4.7.1.2 Comportamento da Absorção de Asfalto pelo Agregado Granítico em Relação ao Teor de Asfalto em Diferentes Misturas

Foi avaliado o comportamento da absorção de asfalto pelos agregados durante a confecção das misturas asfálticas sem fibra, com fibra de coco e fibra de celulose, nos teores ótimos de CAP seguindo as metodologias Superpave e Marshall. Inicialmente, a absorção de asfalto não era um dos assuntos a ser abordado nesta pesquisa, mas, devido à verificação da absorção alta de asfalto pelo agregado granítico e sabendo-se da sua

influência direta no cálculo dos parâmetros usados como critério de projeto da mistura (volume de vazios, vazios do agregado mineral e relação betume-vazios), tomou-se a decisão de investigar mais detalhadamente o assunto.

A Tabela 4.11 apresenta os dados de entrada necessários para o cálculo da absorção de asfalto para as diferentes misturas estudadas. E a Tabela 4.12 apresenta os resultados da taxa de absorção de asfalto nas misturas asfálticas com fibra de celulose, fibra de coco e sem fibra. A densidade do asfalto considerado na pesquisa foi de 1,02.

Tabela 4.11: Dados de entrada das misturas asfálticas com fibra de celulose, fibra de coco e sem fibra.

	Fibra de celulose		Fibra de coco		Sem fibra	
	Superpave	Marshall	Superpave	Marshall	Superpave	Marshall
Teor de asfalto ótimo (%)	6,0	6,0	6,3	6,2	5,9	6,0
Densidade aparente dos agregados	2,427	2,427	2,416	2,420	2,430	2,427
Densidade aparente da mistura compactada	2,296	2,343	2,291	2,296	2,320	2,327
DMM	2,431	2,431	2,407	2,417	2,412	2,400

Tabela 4.12: Resultados da taxa de absorção de asfalto pelos agregados nas diferentes misturas analisadas.

	Fibra de celulose		Fibra de coco		Sem fibra	
	Superpave	Marshall	Superpave	Marshall	Superpave	Marshall
Densidade efetiva do agregado	2,666	2,666	2,649	2,658	2,638	2,627
Absorção de asfalto (%)	0,2	0,2	0,03	0,1	0,2	0,4
Porcentagem de asfalto efetivo na mistura (%)	5,8	5,8	6,3	6,1	5,7	5,6

Ao analisar a Tabela 4.12, pode-se verificar que a absorção de asfalto nas misturas asfálticas com fibra de celulose e com fibra de coco foram semelhantes e a mistura asfáltica sem fibra apresentou valores menores que das outras misturas. Essa diferença de resultados deve-se ao fato das fibras absorverem asfalto durante o processo de mistura.

Analisando as misturas com fibra de coco e sem fibra com maiores teores de asfalto pode-se verificar que estas absorvem menos asfalto. Segundo GOUVEIA (2006), isso mostra uma tendência dos agregados de absorverem mais asfalto quanto menor a espessura da película que os envolve. Uma possível explicação para esse fato é que, quando o teor de asfalto na mistura é menor, também é menor a espessura da película de asfalto que envolve a partícula do agregado, permitindo que o asfalto migre com mais facilidade ao interior dos poros devido à diminuição de sua tensão superficial.

CAPÍTULO 5

CARACTERIZAÇÃO MÊCANICA

Os ensaios de laboratório são utilizados extensivamente com o objetivo de proporcionar maior entendimento do comportamento mecânico dos materiais em campo, visto que os ensaios “in situ”, ou trechos experimentais são, muitas vezes, de difícil realização. Os ensaios de laboratório devem reproduzir tanto quanto possível a situação de campo, isto é, temperatura, tempo de carregamento, níveis de tensão, grau de compactação, etc. Contudo, essas condições sofrem mudanças continuamente em campo, tornando a seleção de condições de ensaio apropriadas uma tarefa não trivial.

No presente trabalho, o comportamento mecânico das misturas foi avaliado por meio dos ensaios de resistência à tração por compressão diametral, módulo de resiliência, fadiga por compressão diametral à tensão controlada e resistência à tração retida por umidade induzida, conforme exposto nos itens seguintes. As misturas selecionadas para realização dos ensaios mecânicos foram referentes as duas metodologias anteriormente mencionadas, levando em consideração: (i) determinação da DMT pela aplicação de vácuo (ASTM D 2041) e DMM; (ii) densidade aparente da mistura não compactada determinada pela metodologia americana (ASTM D 2726-05); (iii) compactação por impacto (Marshall) e por amassamento (Superpave). Desta forma, foram caracterizados mecanicamente um total de seis misturas.

5.1 ENSAIO DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL

O ensaio de resistência à tração por compressão diametral (RT) foi desenvolvido por Lobo Carneiro no Brasil (CARNEIRO, 1953), para determinação da resistência à tração de corpos de prova de concreto-cimento. É um ensaio de ruptura, onde o corpo de prova é posicionado horizontalmente e a carga é aplicada progressivamente, com uma velocidade de deformação de $0,8 \pm 0,1$ mm/s.

O investigador Schmidt de Chevron, Califórnia, introduziu esse ensaio para as misturas betuminosas sob carregamento repetido. A carga é aplicada por compressão diametral em amostras cilíndricas tipo Marshall, induzindo um estado de compressão na direção vertical e de tração na horizontal (PINTO e PREUSSLER, 2002).

As misturas asfálticas devem possuir flexibilidade suficiente para suportar as solicitações do tráfego e resistência à tração adequada para evitar rupturas precoces.

A aparelhagem necessária à execução do Ensaio Resistência à Tração por Compressão Diametral consiste de:

- prensa mecânica com sensibilidade inferior ou igual a 19,6N (ou 2,0kgf), com êmbolo movimentando-se a uma velocidade de $0,8 \pm 0,1$ mm/s (Figura 5.1);
- estufa capaz de manter a temperatura entre 30 e 60°C;
- sistema de refrigeração capaz de manter a temperatura em torno de 25°C;
- paquímetro.



Figura 5.1: Prensa mecânica utilizada para realização dos ensaios de resistência à tração.

O procedimento de ensaio para determinação da resistência à Tração por Compressão Diametral (RT), baseado no DNER ME 138/94 é o seguinte:

- Fazer quatro ou mais medições de altura do corpo de prova com o paquímetro, em diâmetros ortogonais e tomar a média;
- Fazer três medições do diâmetro em três posições de altura e tomar a média;
- Deixar o corpo de prova na câmara de aquecimento ou sistema de refrigeração por um período de 2 horas, de modo a se obter a temperatura específica (25, 30, 45 ou 60°C);
- Colocar o corpo de prova na posição horizontal sobre o prato inferior da prensa, recomenda-se interpor dois frisos metálicos curvos ao longo das geratrizes de apoio superior e inferior;
- Ajustar os pratos da prensa dando ligeira compressão que segure o corpo de prova em posição;
- É aplicada então a carga progressivamente, à razão de $0,8 \pm 0,1$ mm/s, até que se dê a ruptura com a separação das duas metades do corpo de prova, segundo o plano diametral vertical. Anota-se a carga de ruptura;
- Calcula-se a resistência à tração indireta pela Equação 5.1:

$$RT = \frac{2F}{\pi dh} \quad (5.1)$$

Onde RT é a resistência à tração indireta (kgf/cm² ou MPa), F é a carga de ruptura (kgf ou N), d é o diâmetro do corpo de prova (cm ou m) e h é altura do corpo de prova (cm ou m).

Para o presente estudo adotou-se a temperatura de ensaio de 25°C. Os resultados obtidos para as misturas analisadas estão resumidos na Tabela 5.1 e ilustrados na Figura 5.2, onde os resultados são uma média do ensaio de três ou quatro corpos-de-prova para cada mistura.

Tabela 5.1: Resultados do ensaio de resistência à tração (MPa, 25°C).

	Misturas asfálticas SMA 12,5mm		
	Com fibra de coco	Com fibra de celulose	Sem fibra
Marshall	0,76	0,67	0,56
Superpave	1,11	1,14	1,04

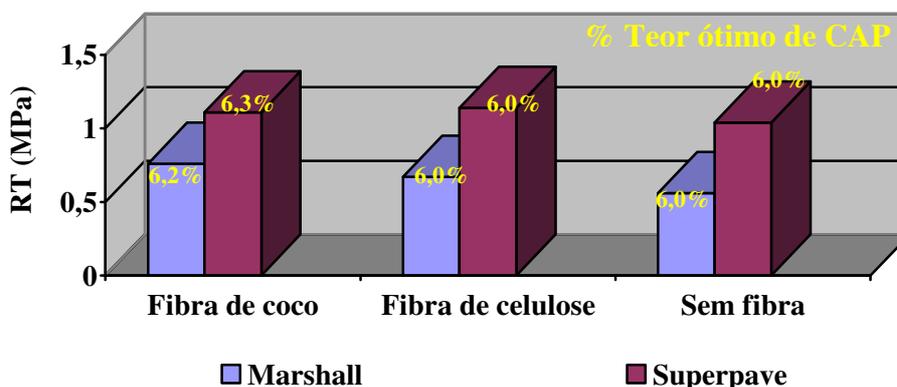


Figura 5.2: Resultados dos ensaios de resistência à tração com os respectivos teores de projeto de cada mistura asfáltica SMA 12,5mm.

Observa-se dos resultados apresentados, que os valores de RT foram inferiores quando adotados a metodologia Marshall de dosagem em relação à Superpave (que considerou envelhecimento de curto prazo de 2h). Vale salientar que os CP's no teor de projeto confeccionados para execução dos ensaios mecânicos foram moldados com 75 giros para dosagens Superpave e com 50 golpes para as dosagens Marshall.

5.2 MÓDULO DE RESILIÊNCIA

O primeiro estudo sistemático de deformabilidade dos pavimentos deve-se a Francis Heveem, em 1955. Foi ele quem introduziu o conceito de resiliência. Ele preferiu utilizar este termo, ao invés de deformação elástica, sob o argumento de que as deformações nos pavimentos são muito maiores do que nos sólidos elásticos com que lida o engenheiro – concreto, aço, etc (MEDINA e MOTTA, 2005).

O ensaio para a determinação do módulo de resiliência, ensaio de tração indireta com carregamento repetido, simula o comportamento mecânico da mistura asfáltica, na

zona onde ocorrem às deformações específicas de tração, responsáveis pela fadiga da camada.

Os materiais que constituem a estrutura de um pavimento quando submetidos a carregamentos dinâmicos, de curta duração e sob tensões muito abaixo de sua plastificação, apresentam comportamento aproximadamente elástico, não necessariamente linear. O tráfego condiciona o conjunto pavimento-fundação de modo semelhante. O módulo de elasticidade determinado através de ensaios laboratoriais, com equipamentos que simulem as condições de campo, denomina-se módulo de resiliência (PINTO e PREUSSLER, 2002).

O módulo de resiliência determinado em ensaios de compressão diametral (tração direta) é a relação entre a tensão de tração normal ao plano vertical diametral aplicada repetidamente, e a respectiva deformação específica resiliente (recuperável) nesse plano, para uma determinada frequência de aplicação de carga, numa dada temperatura (T). O módulo de resiliência (MR) é definido analiticamente pela Equação 5.2:

$$MR = \left(\frac{\sigma_t}{\varepsilon_t} \right)_T \quad (5.2)$$

Onde σ_t é a máxima tensão de tração gerada quando da aplicação da carga dinâmica, e ε_t é a deformação específica resiliente (recuperável) na direção horizontal para um determinado número de aplicações da tensão de compressão vertical.

Segundo MEDINA e MOTTA (2005) a teoria da elasticidade aplicada à solução da distribuição de tensões e deformações em cilindros carregados diametralmente permite exprimir o módulo de elasticidade em função da força vertical aplicada F, e do deslocamento horizontal produzido e mensurável, bastando conhecer o coeficiente de Poisson do material e as dimensões do corpo de prova. Sendo assim, a Equação 5.2 teria a seguinte configuração:

$$MR = \frac{F}{t\delta_r}(0,9976\mu + 0,2692) \quad (5.3)$$

Onde MR é dado em kgf/cm², F é a carga vertical repetida aplicada diametralmente no corpo de prova N vezes (kgf), t é a altura do corpo de prova (cm), δ_r é o deslocamento resiliente registrado a N aplicações de carga, e μ é o coeficiente de Poisson (podendo ser considerado como 0,30). É importante lembrar que para a Equação 5.3 o diâmetro da amostra é constante e igual a 10,16cm.

De uma forma geral, pode-se dizer que o módulo de resiliência: (i) varia com a granulometria da mistura, sendo maior quanto mais grossa for a faixa adotada; (ii) varia com o ligante asfáltico sendo maior quanto menor a penetração do asfalto ou maior a sua viscosidade, não sendo muito sensível ao teor de asfalto, desde que dentro da faixa normal de dosagem. Outros fatores influenciam também, tais como a relação ligante/fíler e a própria natureza do fíler (MOTTA *et al.*, 1996).

O ensaio para determinação do módulo de resiliência é realizado em um equipamento composto por uma prensa, sistema pneumático com o controle do tempo e frequência de aplicação da carga, sistema de aplicação da carga, sistema de medição do deslocamento diametral horizontal do corpo de prova quando submetido à carga e sistema de controle de temperatura (Figura 5.3).



Figura 5.3: Equipamento de carga repetida LMP/UFC.

O procedimento de ensaio para determinação do Módulo de Resiliência, baseado no DNER ME 133/94 é o seguinte:

- prender o quadro suporte por meio de garras nas faces externas do corpo de prova cilíndrico que se encontra apoiado horizontalmente segundo uma diretriz;
- posicionar o corpo de prova na base da prensa, apoiando o mesmo no friso côncavo inferior;
- assentar o pistão de carga com o friso superior em contato com o corpo de prova diametralmente oposto ao friso inferior;
- fixar, ajustar e calibrar dois medidores eletromecânicos tipo LVDT (*Linear Variable Differential Transducer*) que são transdutores de variáveis diferenciais lineares, de modo a obter registros na aquisição dos dados;
- aplicar uma carga F que produza uma tensão à tração σ_t , que seja 30% da resistência da tração estática da mistura;
- a frequência de aplicação das cargas é de 1Hz (60 ciclos por minuto) com tempo de carregamento de 0,1 segundo e 0,9 segundo de descarregamento;

- registram-se os deslocamentos horizontais durante a aplicação da carga F.

Segundo SOUZA (1997) o tempo de aplicação de carga simula a velocidade de translação dos eixos dos veículos no campo enquanto a frequência reproduz o número de eixos que passam em determinada seção de rodovia. De acordo com a própria concepção do ensaio de módulo, este está intimamente relacionado às velocidades do tráfego.

Os resultados obtidos para as seis misturas analisadas encontram-se resumidos na Tabela 5.2 e podem ser melhor visualizados na Figura 5.4. Os valores apresentados são a média aritmética de três CP's a depender da mistura e da variação observada entre os mesmos. Observa-se que as misturas dosadas pela metodologia Superpave apresentaram maiores valores que as misturas dosadas pela metodologia Marshall.

Tabela 5.2: Resultados do ensaio de módulo de resiliência (MPa, 25°C).

	Misturas asfálticas SMA 12,5mm		
	Com fibra de coco	Com fibra de celulose	Sem fibra
Marshall	2689	3184	3423
Superpave	4003	4111	4340

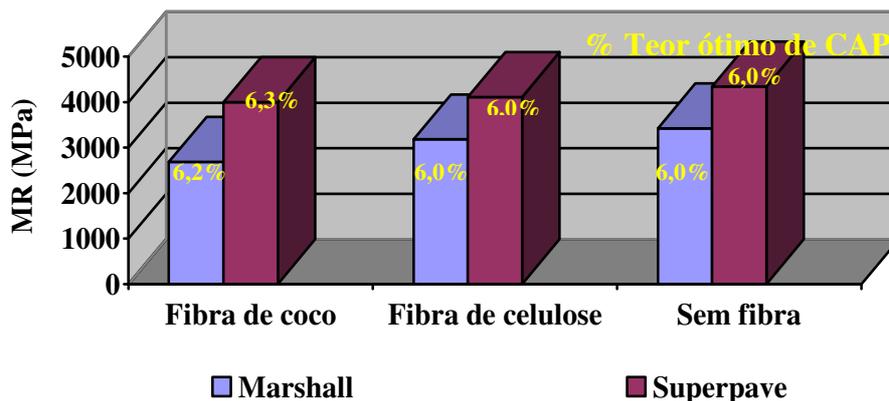


Figura 5.4: Resultados dos ensaios de módulo de resiliência com os respectivos teores de projeto de cada mistura asfáltica SMA 12,5mm.

Foi avaliado também o valor de MR/RT, a fim de comparar esses valores com os encontrados por VASCONCELOS (2004) para misturas asfálticas SMA de tamanho

máximo nominal 12,5mm, que utilizou o CAP 50/60 proveniente do petróleo nacional Fazenda Alegre. Os resultados encontrados pelo autora variaram de 4.000 à 4.900. Para o presente estudo obtiveram-se os valores descritos na Tabela 5.3 e ilustrados na Figura 5.5.

Tabela 5.3: Resultados da razão MR/RT.

Misturas asfálticas SMA 12,5mm			
	Com fibra de coco	Com fibra de celulose	Sem fibra
Marshall	3553	4762	6112
Superpave	3606	3611	4173

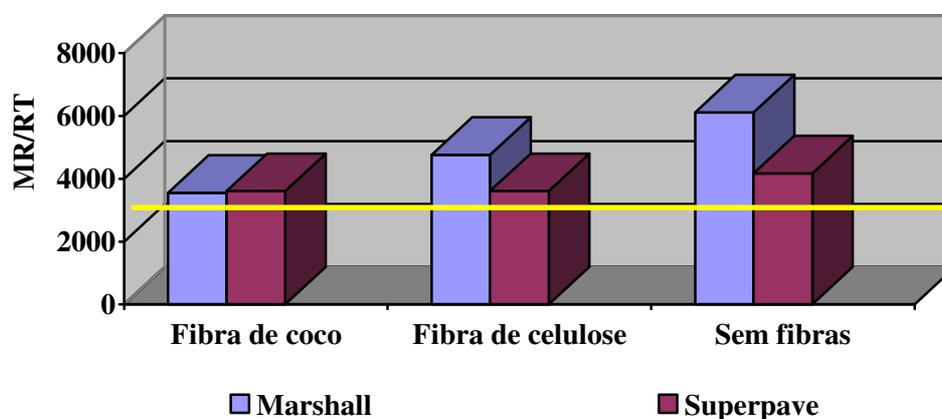


Figura 5.5: Resultados da razão MR/RT com os respectivos teores de projeto de cada mistura asfáltica SMA 12,5mm.

O valor de aproximadamente 3.000 para a razão MR/RT é obtido para diversas misturas tipo CBUQ produzidas com o ligante da refinaria Lubnor/Petrobras. Alguns pesquisadores acreditam que quanto menor o valor dessa razão, maior será a vida de fadiga obtida para esse mesmo tipo de mistura asfáltica. A relação, porém, foi “criada” para ser utilizada por universidades que não dispunham do equipamento para ensaio de MR (sendo necessária uma análise para cada caso particular). Porém, ambos os fatos não foram verificados nesse estudo. Para as seis misturas de SMA`’s estudados, a razão MR/RT variou de 3.500 a 6.100 e não houve a correlação dos valores inferiores com uma maior vida de fadiga, conforme será abordado no item a seguir.

5.3 FADIGA POR COMPRESSÃO DIAMETRAL À TENSÃO CONTROLADA

É possível dividir os materiais de pavimentação sob carregamento dinâmico em duas parcelas:

- a flexão repetida que leva à fadiga dos materiais e em consequência o trincamento;
- a compressão simples repetida que leva à deformação permanente e em consequência ao afundamento de trilha de roda.

A fadiga é um processo de deterioração estrutural que sofre um material quando submetido a um estado de tensões e deformações repetidas, que podem ser muito menores que a resistência última do material, resultando em trincas, após um número suficiente de repetições do carregamento: é a perda da resistência que sofre um material quando solicitado repetidamente à flexão ou à tração (PINTO e MOTTA, 1995).

Segundo PINTO e PREUSLLER (2002), no ensaio de fadiga o material é submetido à solicitações repetidas levando à evolução de dano de modo irreversível até um estágio final de ruptura ou estabilização. Com o objetivo de estimar a vida de fadiga de misturas asfálticas, dispõem-se de ensaios laboratoriais que procuram simular as condições de solicitação de uma rodovia (ensaios executados em placas ou vigas apoiadas em suporte) e os que procuram uma aproximação fundamentada (ensaios laboratoriais executados em corpos de prova cilíndricos ou prismáticos, submetidos a níveis de tensões ou deformações de modo a simular a condição de solicitação no campo).

Os equipamentos laboratoriais para os ensaios de carga repetida permitem a aplicação de carregamentos cíclicos ao material sob regime de tensão constante ou controlada e de deformação constante ou controlada. A grande separação que se pode fazer entre os diferentes ensaios é quanto ao modo de solicitação.

No ensaio de tensão controlada (TC), a carga aplicada é mantida constante e as deformações resultantes aumentam no decorrer do ensaio. O ensaio de deformação

controlada (DC) envolve a aplicação de cargas repetidas que produzam uma deformação constante ao longo do ensaio, o que conduz a uma diminuição da carga aplicada, para manter a deformação constante. Em ambos os ensaios há uma redução da rigidez inicial do material a um nível que pode ser pré-estabelecido, no sentido de definir o fim do ensaio (PINTO e PREUSSLER, 2002). A grande vantagem do ensaio de DC é permitir melhor observação da propagação de fissuras por fadiga.

No ensaio à tensão controlada (TC), o critério de fadiga está associado à fratura da amostra. A tensão é mantida constante ao longo do ensaio e as deformações atingem um valor máximo até o estágio de colapso do corpo de prova. A vida de fadiga (N) é definida como um número total de aplicações de uma carga necessária à fratura completa da amostra (PINTO e PREUSSLER, 2002).

Já no ensaio à deformação controlada (DC) o critério de fadiga não está condicionado à ruptura completa do corpo de prova, pois para que a deformação seja mantida constante ao longo do ensaio, é necessário que haja uma diminuição no carregamento aplicado. A vida de fadiga neste caso será o número de repetições de carga capaz de reduzir o desempenho ou rigidez inicial da amostra a um nível pré-estabelecido. Segundo MEDINA e MOTTA (2005) a solicitação a tensão controlada (TC) é a que ocorre em pavimentos de revestimento asfáltico muito mais rígido do que a camada de base e que ao resistirem às cargas determinam a magnitude das deformações. A solicitação a deformação controlada (DC) corresponde melhor a pavimentos de revestimento delgado e fraco em relação à base; embora adicionando alguma resistência, o revestimento tem sua deformação controlada dependerá tanto da espessura e do módulo de rigidez do revestimento, como do módulo da estrutura subjacente.

Segundo PINTO e MOTTA (1995) na condição de carregamento dinâmico a solicitação pode ser simples ou complexa, sendo que na solicitação simples os parâmetros de carga são mantidos constantes durante o ensaio (a forma, a duração, a frequência, e o nível da carga). Em qualquer das formas de ensaio, a ruptura por fadiga expressa pelo número N de solicitações necessárias para o fim do ensaio, é relacionada à tensão de tração (σ_t) aplicada ou deformação de tração inicial (ϵ_t), por meio de modelos do tipo log-log, como visto a seguir:

$$N = \left(\frac{1}{\sigma_t} \right)^n \quad (5.4)$$

$$N = k_1 \left(\frac{1}{\varepsilon_t} \right)^{n_1} \quad (5.5)$$

$$N = k_2 \left(\frac{1}{\Delta\sigma} \right)^{n_2} \quad (5.6)$$

$$N = k_3 \left(\frac{\sigma_t}{RT} \right)^{n_3} \quad (5.7)$$

Onde N é o número de repetições de carga necessárias à ruptura do corpo de prova (vida de fadiga), σ_t é a tensão controlada de tração aplicada, ε_t é a deformação de tração, $\Delta\sigma$ é a diferença entre tensão vertical e horizontal, RT é a resistência à ruptura estática do material, e k_i , n_i são parâmetros experimentais.

Segundo MEDINA e MOTTA (2005) e INSTITUTO DE ASFALTO (2001) teores de betume crescentes melhoram a vida de fadiga e o desgaste superficial. Porém, deve-se observar um teor adequado também sob o aspecto da deformação permanente que, ao contrário, aumenta com o teor de betume. Misturas asfálticas densamente graduadas apresentam resistência à fadiga maior do que a das misturas de graduação aberta; agregados bem graduados permitem teores maiores de asfalto sem causar exsudação no pavimento compactado.

É clara a importância que tem a temperatura na vida de fadiga de misturas asfálticas. Um aumento de temperatura reflete-se de dois modos na vida de fadiga: diminui MR, vale dizer, para uma força aplicada, a deformação específica à tração aumenta, ao mesmo tempo diminui a resistência à tração e a razão da tensão atuante sobre a resistência aumenta (MEDINA, 1997).

O procedimento para o Ensaio de fadiga à tensão controlada (TC) utilizado pelo Laboratório de Mecânica dos Pavimentos da Universidade Federal do Ceará é o seguinte:

- posicionar o corpo de prova na base da prensa, apoiando o mesmo no friso côncavo inferior;
- assentar o pistão de carga com o friso superior em contato com o corpo de prova diametralmente oposto ao friso inferior (Figura 5.6);
- aplicar uma carga F que induza tensões de tração horizontais aproximadamente entre 10 e 50% da tensão à tração σ_{TR} previamente controlada;
- a frequência de aplicação das cargas é de 1Hz (60 ciclos por minuto) com tempo de carregamento de 0,1 segundo e 0,9 segundo de descarregamento;



Figura 5.6: Equipamento de fadiga por compressão diametral a tensão controlada LMP/UFC.

Para cada metodologia analisada (Marshall e Superpave) foram realizados ensaios com três níveis de tensão (30, 40 e 50% de RT), devido ao tempo disponível

para execução dos ensaios. Para cada nível de tensão foram ensaiados de três a cinco CP's, a depender a dispersão dos resultados. O nível de tensão aqui referido diz respeito à tensão de tração no centro do CP não danificado submetido a compressão diametral. A carga no CP é ajustada de forma a produzir o nível de tensão desejado. As Figuras 5.7 e 5.8 apresentam o comportamento das misturas asfálticas SMA 12,5mm para os níveis de tensão estudados.

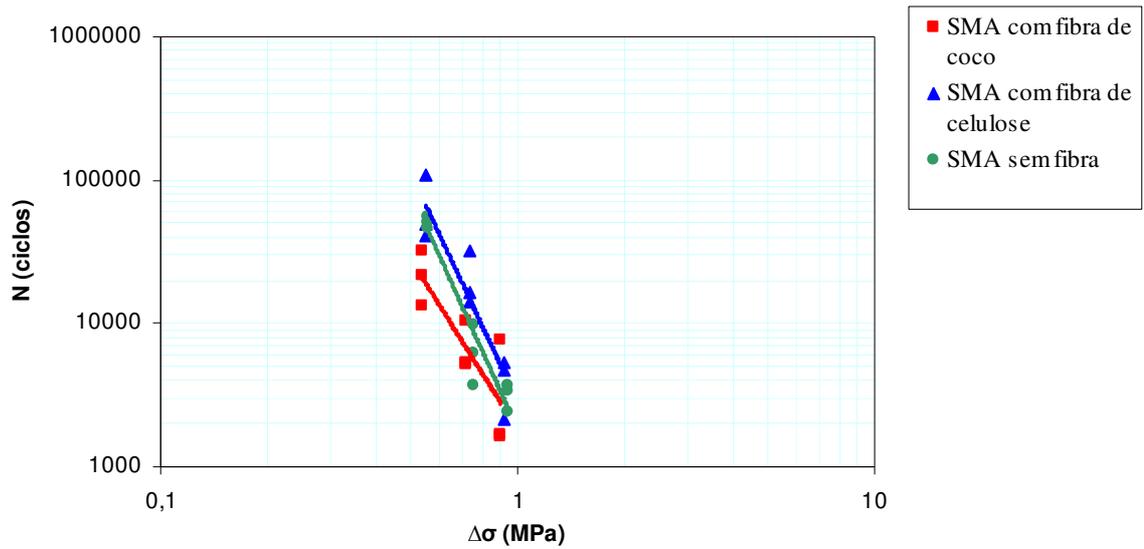


Figura 5.7: Vida de fadiga versus diferença de tensões para as misturas asfálticas SMA 12,5mm dosadas pela metodologia Marshall.

Analisando o gráfico de vida de fadiga observa-se que as misturas SMA, seguindo a metodologia Marshall confeccionadas com fibras de celulose, apresentaram uma vida de fadiga equivalente à vida de fadiga das misturas asfálticas SMA sem fibras. Pode-se observar também uma grande variação nos valores de N (ciclos) para um mesmo nível de tensões. Estas variações elevadas não permitem avaliar corretamente, se a incorporação das fibras de coco, em especial, melhorou ou prejudicou o comportamento das misturas. Esta variação pode ter ocorrido em virtude da grande heterogeneidade das misturas promovidas pelas fibras de coco durante a confecção dos corpos de prova.

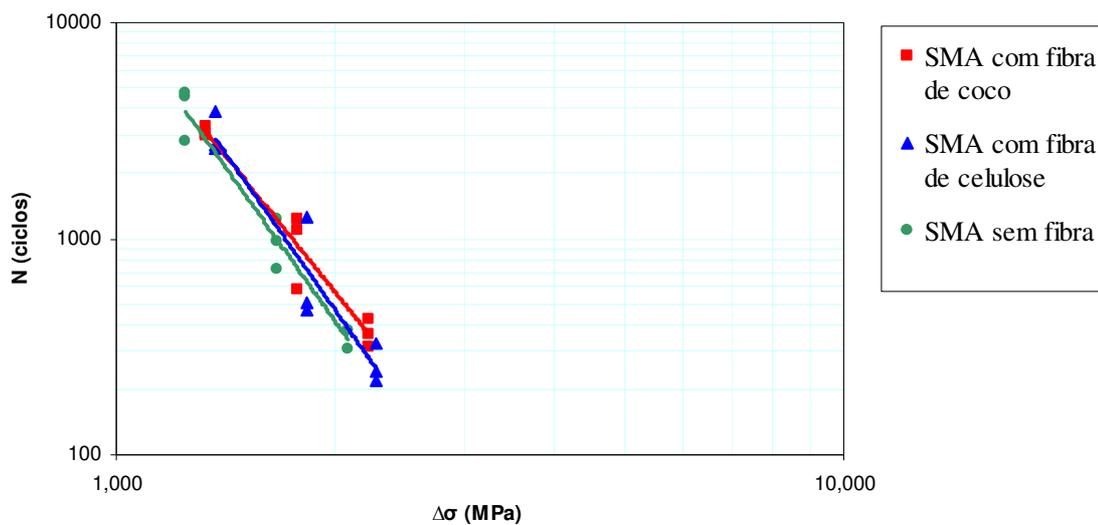
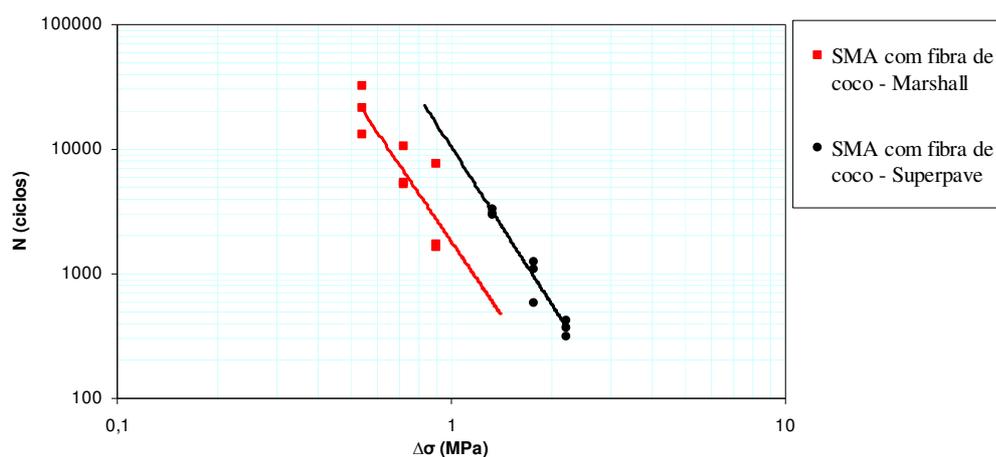


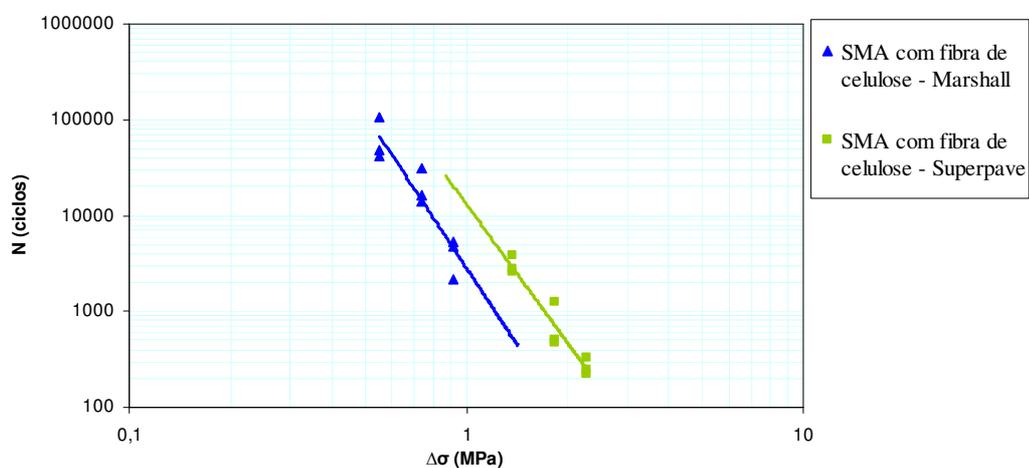
Figura 5.8: Vida de fadiga versus diferença de tensões para as misturas asfálticas SMA 12,5mm dosadas pela metodologia Superpave.

Os resultados obtidos para as três misturas Superpave levam a algumas conclusões: (i) nas Figuras 5.7 e 5.8 observa-se que as misturas SMA Superpave apresentaram menor dispersão entre os resultados se comparadas com as misturas dosadas pela metodologia Marshall; (ii) a inclinação da reta para a mistura SMA sem fibra assemelhou-se a inclinação obtida para as misturas SMA com fibra de celulose. Outro fator importante é que a análise da vida de fadiga das misturas em campo deve ser feita levando em consideração a estrutura sobre a qual a camada asfáltica foi ou será aplicada.

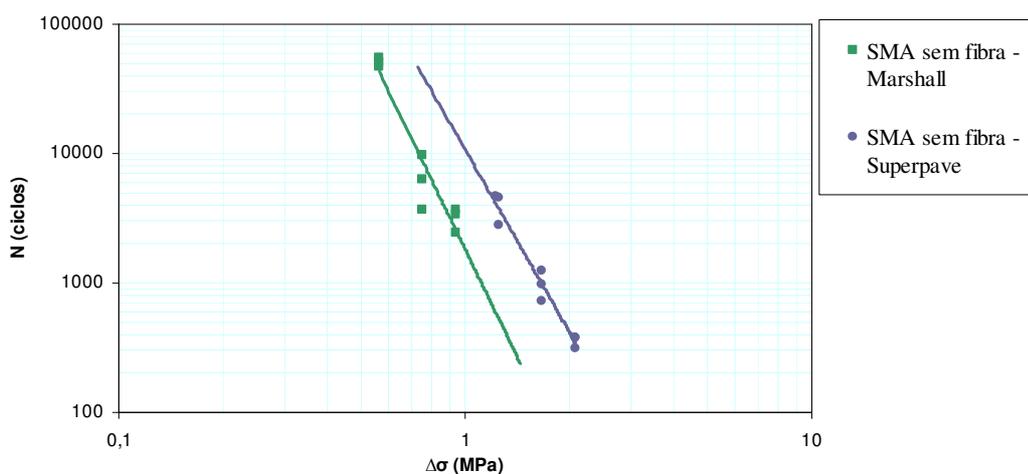
Dos resultados obtidos para as três misturas asfálticas SMA 12,5mm dosadas pela metodologia Marshall e Superpave observa-se que as retas apresentam inclinação bastante semelhante. As Figuras 5.9(a) a 5.9(c) ilustram as diferenças obtidas para cada uma das misturas SMA 12,5mm quando foi variado o procedimento de dosagem.



(a)



(b)



(c)

Figura 5.9: Vida de fadiga versus diferença de tensões para as misturas asfálticas SMA 12,5mm dosadas pela metodologia Marshall e Superpave.

Observa-se dos três gráficos apresentados na Figura 5.9, que a inclinação da reta do ensaio de vida de fadiga para as misturas SMA 12,5mm dosadas pela metodologia Marshall e Superpave foram semelhantes, apesar da diferença dos níveis de tensão. A comparação entre as vidas de fadiga para este tipo de ensaio é limitada porque o desempenho das misturas em campo está associado às tensões na estrutura do sistema de camadas (CTPETRO, 2003).

É importante observar que como em campo o número de aplicações é bem maior do que ocorre no ensaio, a inclinação das retas torna-se mais importante do que o fato de uma estar ou não sobre a outra (CASTELO BRANCO, 2004).

Essa tendência de maior vida de fadiga das misturas dosadas pela metodologia Superpave pode ser influência da orientação de agregados obtida durante o processo de compactação das misturas com o compactador giratório. Conforme mencionado por HUNTER *et al.* (2004), a compactação por amassamento tende a orientar os agregados circunferencialmente no plano horizontal, devido ao efeito do confinamento da borda, ou do efeito da força cisalhante. No trabalho realizado pelos referidos autores as misturas compactadas com o compactador giratório e com o compactador vibratório produziram misturas mais resistentes à deformação permanente, que as misturas compactadas em placas. A Figura 5.10 apresenta dois CP's serrados da mistura SMA com fibra de coco investigada no presente estudo. O CP da esquerda representa o obtido através do compactador Marshall, enquanto o da direita, um CP obtido através de compactação por amassamento. Visualmente é difícil quantificar a orientação dos agregados, até mesmo porque essa orientação varia de forma considerável de CP para CP.

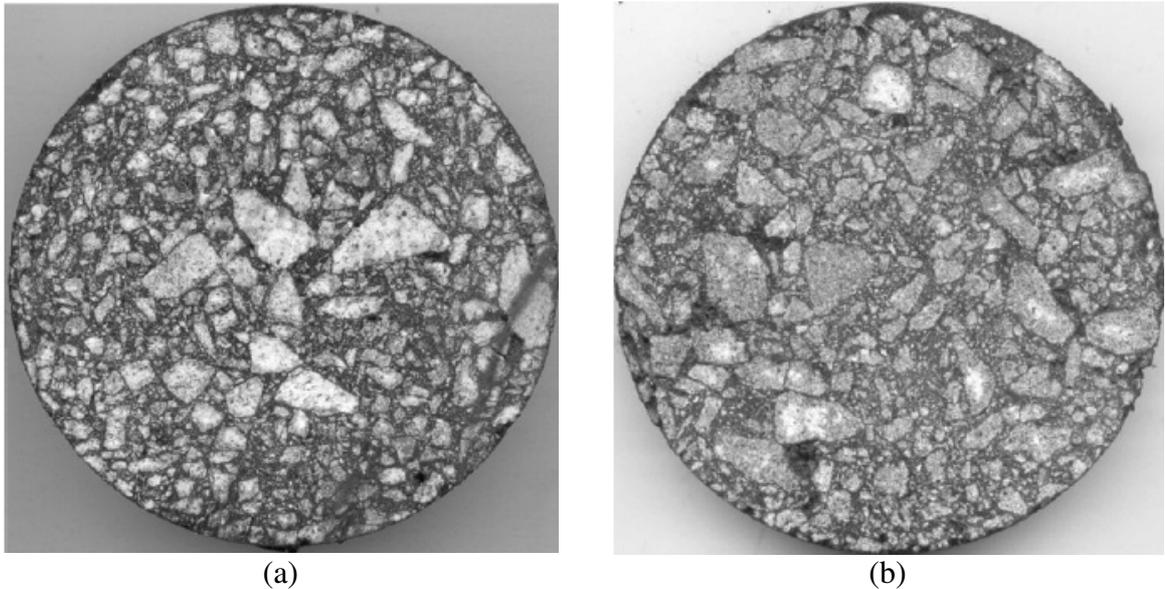


Figura 5.10: CP`s serrados da mistura asfáltica: (a) SMA com fibra de coco na metodologia Marshall e (b) SMA com fibra de coco na metodologia Superpave.

5.4 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO RETIDA POR UMIDADE INDUZIDA

A avaliação do dano causado pela umidade é de grande importância, pois afeta diretamente o desempenho e a vida de serviço dos pavimentos. Os testes para identificação do potencial ao dano por umidade em misturas asfálticas podem ser classificados em duas categorias: aqueles realizados em misturas não compactadas e os realizados em misturas compactadas (SOLAMANIAN *et al.*, 2004). Existe, porém, a dificuldade de associar os resultados de testes obtidos em laboratório com o desempenho das misturas em campo (EPPS *et al.*, 2000). A Tabela 5.4 apresenta um resumo dos testes de sensibilidade à umidade existentes para amostras compactadas.

Tabela 5.4: Testes de sensibilidade a umidade para amostras compactadas (Fonte: SOLAMANIAN *et al.*, 2004).

Teste	ASTM	AASHTO	Outros
<i>Moisture vapor susceptibility</i>			Califórnia Test 307
<i>Immersion-compression</i>	D1075	T 165	ASTM STP 252
<i>Marshall immersion</i>			Stuart 1986
<i>Freeze-thaw pedestal test</i>			Kennedy et al. 1982
<i>Original Lottman indirect tension</i>			NCHRP Report 246 (Lottman 1982) Transportation Research Board 515 (1974)
<i>Modified Lottman indirect tension</i>		T 283	NCHRP Report 274 (Tunnicliff e Root 1984), Tex 531-C
<i>Tunnicliff-Root</i>	D4867		NCHRP Report 274 (Tunnicliff e Root 1984)
<i>ECS with resilient modulus</i>			SHRP-A-403 (Al-Swailmi e Terrel 1994)
<i>Hamburg wheel tracking</i>			1993 Tex-242-F
<i>Asphalt pavement analyzer</i>			Método em estudo na ASTM
<i>ECS/SPT</i>			NCHRP 9-34 2002-03
<i>Multiple freeze-thaw</i>			

O teste de sensibilidade à ação deletéria da água foi realizado seguindo o procedimento descrito em AASHTO T 283. Este procedimento de ensaio foi elaborado baseado no trabalho de R.P. Lottman (NCHRP Project 4-08), e um posterior trabalho realizado por D.G. Tunnicliff e R.E. Root (NCHRP Project10-17) (EPPS *et al.*, 2000; MOURA, 2001).

Segundo AASHTO T 283, os CP`s podem ser preparados em laboratório seguindo os métodos Marshall, Hveem ou Superpave. O procedimento de ensaio pode ser resumido através dos passos descritos a seguir.

- moldar seis CP`s com vazios entre 6 e 8% no teor de projeto de ligante;
- separar três desses CP`s para aplicação de uma pressão de 254 – 660mm Hg, a fim de obter saturação entre 55 e 80%;
- colocar os três CP`s para congelamento (-18°C) por um período mínimo de 16h. Os CP`s devem ser cobertos por um filme plástico, colocados dentro de um saco vedado com 10ml de água;

- imergir os CP`s em um banho a 60°C por um período de 24 ± 1 h, após a retirada do filme e do saco plástico;
- retirar os três CP`s do banho de 60°C e imergi-los em um banho a 25°C por um período de 2 ± 1 h;
- realizar ensaio de resistência à tração nos três CP`s após todo o ciclo de condicionamento (RTu). Os outros três CP`s devem ser submetidos ao ensaio de resistência à tração sem o ciclo de condicionamento (RT);
- calcular a resistência à tração retida por umidade induzida, que e a razão entre RTu e RT.

As Figuras 5.11(a) a 5.11(f) ilustram alguns passos adotados no processo de condicionamento e ensaio de RT e RTu dos CP`s.



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



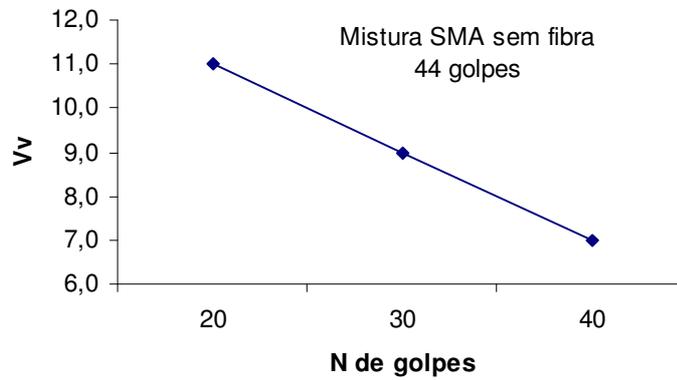
(f)

Figura 5.11: Alguns passos para a determinação da RT e RTu.

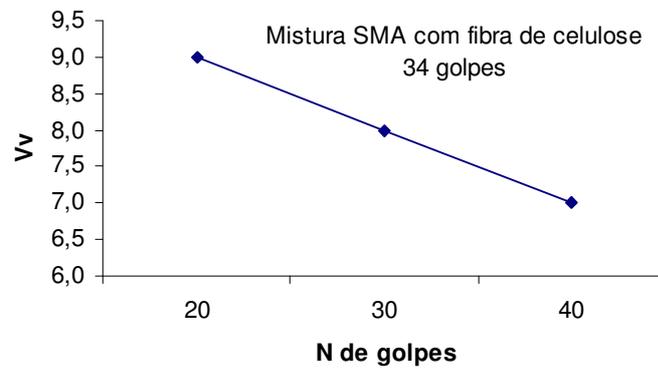
Para a confecção dos CP's das dosagens Marshall com vazios entre 6 e 8%, foi necessária a moldagem de CP's com diferentes números de golpes, a fim de traçar um gráfico número de golpes \times volume de vazios, para que se obtivesse o número de golpes necessários. A Figura 5.12 ilustra os gráficos obtidos para as misturas SMA 12,5mm sem fibra, com fibra de celulose e com fibra de coco. Para a realização do ensaio de RRT, porém, o número de golpes deve ser determinado para cada mistura separadamente a fim de fixar o Vv. A Tabela 5.5 resume o número de golpes necessário para obtenção dos vazios exigidos em norma para as três misturas SMA seguindo a metodologia Marshall.

Tabela 5.5: Número de golpes para obtenção dos vazios exigidos em AASHTO T 283 – Marshall.

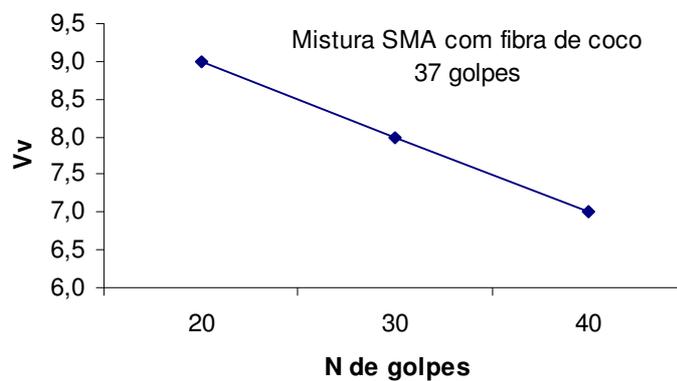
Misturas SMA	Nº de golpes
Sem fibra	44
Com fibra de celulose	34
Com fibra de coco	37



(a)



(b)



(c)

Figura 5.12: Gráficos para obtenção do número de golpes necessários para Vv entre 6 à 8% (a) mistura SMA sem fibra; (b) mistura SMA com fibra de celulose e (c) mistura SMA com fibra de coco.

Para as misturas dosadas pela metodologia Superpave, procedeu-se de forma diferente para a obtenção do número de giros necessários para obtenção de vazios entre 6 e 8%. No procedimento de compactação Superpave tem-se o acompanhamento das alturas do CP durante todo o processo. Dessa forma, é possível obter-se uma estimativa dos volumes de vazios para os diferentes números de giros. Os parâmetros volumétricos adotados como referência foram determinados a partir dos CP's moldados no teor de projeto para realização dos demais ensaios mecânicos. A Tabela 5.6 apresenta o resultado do número de giros necessários à obtenção dos vazios exigidos em AASHTO T 283 para as diferentes misturas.

Tabela 5.6: Número de giros para obtenção dos vazios exigidos em AASHTO T 283 – Superpave.

Misturas SMA	Nº de giros
Sem fibra	60
Com fibra de celulose	55
Com fibra de coco	80

A Tabela 5.7 apresenta os resultados obtidos para a resistência a tração por compressão diametral após o condicionamento (saturação, congelamento e aquecimento em água), a resistência a tração por compressão diametral sem condicionamento e a resistência a tração retida por umidade induzida (RRT) para as misturas analisadas.

Tabela 5.7: Resultados de RT, RT_u e RRT para as misturas asfálticas SMA 12,5mm analisadas.

		Misturas asfálticas SMA		
		Fibra de coco	Fibra de celulose	Sem fibra
Marshall	RT (MPa)	0,76	0,67	0,56
	RT _u (MPa)	0,70	0,48	0,28
	RRT	91%	71%	50%
Superpave	RT (MPa)	1,11	1,14	1,04
	RT _u (MPa)	0,97	1,04	0,58
	RRT	87%	91%	56%

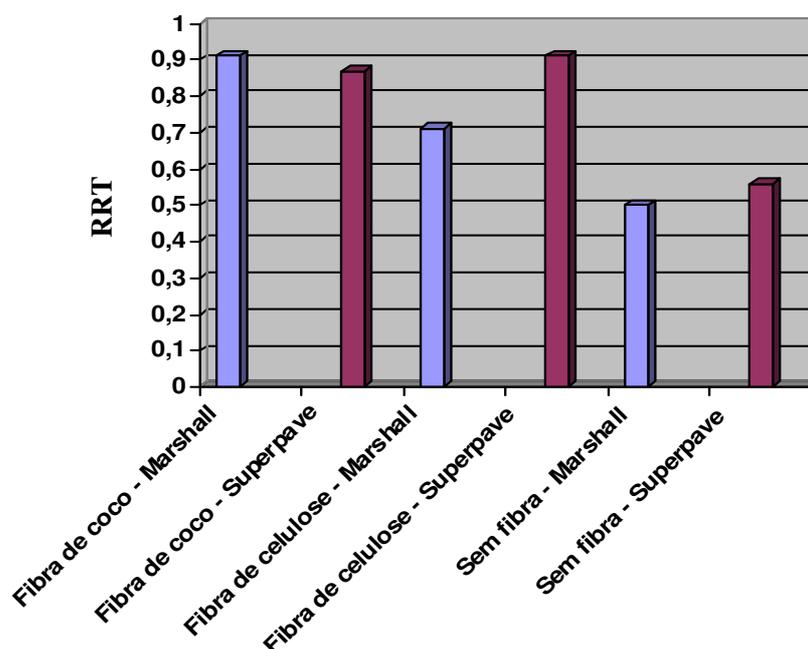


Figura 5.13: Resultados de RRT para as misturas asfálticas SMA 12,5mm analisadas.

Observa-se da Figura 5.13 que a adição de fibras na mistura aumenta o valor de RRT. A mistura SMA com fibra de coco dosada pela metodologia Marshall e as misturas SMA com fibra de celulose e fibra de coco, ambas, dosadas pela metodologia Superpave apresentaram valores de RRT superiores a 70%.

Para as misturas SMA, o limite para RRT é de 70% segundo a especificação AASHTO MP8-01. As misturas SMA com fibra de celulose e fibra de coco apresentaram valores superiores ao limite imposto pela norma. Outro fator importante a ser levado em consideração é o fato das misturas SMA terem em sua composição a cal hidratada, que é um melhorador de adesividade. Observa-se dos resultados obtidos nessa pesquisa, que o ensaio de adesividade isoladamente realizado para a brita ¾" isoladamente (DNER-ME 078/94) não garante que a mistura como um todo irá apresentar bom comportamento à ação deletéria da água.

CAPÍTULO 6

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Para se fazer uma comparação com os valores de RT, MR e vida de fadiga escolheu-se trabalhar também com misturas do tipo SMA com fibra de celulose utilizando as mesmas características da mistura SMA com fibra de coco. A mistura que utiliza fibra de celulose serviu como referência para a análise da mistura com fibra de coco, pois já existem diversos estudos que comprovaram a eficiência da fibra de celulose em misturas asfálticas.

Essa análise da viabilidade do uso da fibra de coco local é importante para a região Nordeste, devido à valorização do material regional e também por ser economicamente viável quando comparado à fibra de celulose, devido a sua abundância na região.

6.1 CONCLUSÕES

As principais conclusões sobre o tema proposto, fundamentadas em literatura e nos ensaios realizados nas misturas adotadas, são:

- a) A determinação da DMT através da ponderação das densidades reais dos materiais constituintes, e do procedimento com aplicação de vácuo (DMM) resultaram em valores numericamente próximos. Os valores de DMM foram mais sensíveis a variação do tipo de mistura, que os valores de DMT.
- b) A variação dos métodos de ensaio para determinação da DMT e da densidade aparente do CP (D_a) compactado levou a teores de projeto diferentes em até 0,7% para as misturas SMA dosadas pela metodologia Superpave.

- c) O aumento no teor de projeto atribuído às dosagens Marshall é influência da forma de determinação da DMT, através da ponderação das densidades reais dos materiais constituintes, bem como do processo de compactação (impacto).
- d) A maior dispersão nos parâmetros volumétricos dos CP`s moldados no teor de projeto para as misturas Superpave, em relação a Marshall, pode ser devido ao fator de correção adotado para correção da densidade aparente durante o procedimento de dosagem, que é assumido como constante ao longo de todos os giros.
- e) Conclui-se que a fibra de coco apresentou boa eficiência com relação ao escorrimto, porém apresentou dificuldades na sua trabalhabilidade durante a confecção dos corpos-de-prova, devido ao seu tamanho inicial de 30mm. Tal fato pode ser responsável pela diferença dos valores encontrados no gráfico de vida de fadiga. Estas diferenças motivaram o estudo de outras configurações da fibra de coco utilizadas na confecção das misturas SMA, especialmente, o estudo de fibras com menores comprimentos, de forma a melhorar a trabalhabilidade da mistura solta e aumentar a homogeneidade da mistura compactada. A fibra de coco deve ter um tamanho máximo de 20mm, pois esta tende a formar gomos no momento da mistura, dificultando a trabalhabilidade na execução.
- f) Nos ensaios de resistência à tração por compressão diametral e módulo de resiliência as misturas asfálticas SMA 12,5mm dosadas pela metodologia Superpave apresentaram valores superiores às misturas dosadas pela metodologia Marshall, muito provavelmente devido ao envelhecimento de curto prazo sofrido pelas primeiras.
- g) A mistura SMA com fibra de coco dosada pela metodologia Marshall e as misturas SMA com fibra de celulose e fibra de coco, ambas, dosadas pela metodologia Superpave apresentaram valores de RRT superiores a 70%, que segundo MOURA (2001) deve ser o limite para que a amostra seja aprovada.

- h) Foi observada uma tendência de maior vida de fadiga das misturas dosadas pela metodologia Marshall com relação à dosagem Superpave, talvez pela influência da distribuição dos agregados obtida durante o processo de compactação e também do processo de envelhecimento em curto prazo.

6.2 RECOMENDAÇÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

Tendo em vista os resultados obtidos nesta dissertação são sugeridos os seguintes tópicos para estudos futuros:

- a) Avaliar a sensibilidade da mistura asfáltica SMA quanto à resistência à deformação permanente em simulador de tráfego, por obter melhor correlação com dados de campo.
- b) Avaliação laboratorial da mistura asfáltica SMA de tamanho máximo nominal 9,5mm utilizando a fibra de coco.
- c) Propor formas convenientes de incorporar as fibras de coco nas misturas asfálticas tipo SMA durante os processos de usinagem, antes ou depois da adição do cimento asfáltico de petróleo (CAP).
- d) Propor a construção de um trecho experimental com a mistura asfáltica SMA 12,5mm utilizando fibra de coco e monitoramento sistemático dos índices de qualidade de rolamento e de segurança aos usuários.
- e) Análise de custo das alternativas estudadas a partir de análise estrutural.
- f) Avaliar aspectos de durabilidade das misturas asfálticas SMA fabricadas com fibra de coco.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AASHTO – American Association of State Highway and Transportation (1989) *T 283 – Resistance of Compacted Bituminous Mixture to Moisture Induced Damage.*
- AASHTO – American Association of State Highway and Transportation (1994) *T 209 – Standard Method of Test for Maximum Specific Gravity of Bituminous Paving Mixtures.*
- AASHTO – American Association of State Highway and Transportation (1997) *T 305 – Determination of Draindown Characteristics in Uncompacted Asphalt Mixtures.*
- AASHTO – American Association of State Highway and Transportation (2000) *T 19 – Standard Method of Test for Bulk Density (“Unit Weight”) and Voids in Aggregate.*
- AASHTO – American Association of State Highway and Transportation (2001) *PP 41 – Standard Practice for Designing Stone Matrix Asphalt (SMA).*
- AASHTO – American Association of State Highway and Transportation (2001) *MP 8 – Standard Specification for Designing Stone Matrix Asphalt (SMA).*
- AASHTO – American Association of State Highway and Transportation (2002) *T 165 – Standard Method of Test for Effect of Water on Compressive Strength of Compacted Bituminous Mixtures.*
- AASHTO – American Association of State Highway and Transportation (2005) *T 158 – Standard Method of Test for Bleeding of Concrete*
- AASHTO – American Association of State Highway and Transportation (2007) *T 283 – Standard Method of Test for Resistance of Compacted Hot Mix Asphalt (HMA) to Moisture-Induced Damage*
- ABNT NBR 6576 (1998) – Materiais betuminosos. Determinação da penetração.
- ABNT NBR 6560 (2000) – Materiais betuminosos. Determinação do ponto de amolecimento Método do anel e bola.
- ABNT NBR 14855 (2003) – Materiais betuminosos. Determinação da solubilidade em tricloroetileno.
- ABNT NBR 14950 (2003) – Materiais betuminosos. Determinação da viscosidade Saybolt Furol.
- ABNT NBR 11341 (2004) – Derivados de petróleo. Determinação dos pontos de fulgor e de combustão em vaso aberto Cleveland.

- ABNT NBR 15184 (2004) – Materiais betuminosos - Determinação da viscosidade em temperaturas elevadas usando um viscosímetro rotacional
- ALDIGUERI, D.R.; SILVEIRA, M.A.; SOARES, J.B. (2001) Estudo Comparativo entre Compactação Manual e Automática de Misturas Asfálticas. *33ª Reunião Anual de Pavimentação, ABPv*, Florianópolis, v.I, p. 804 -813.
- ANDRADE, C.F. (1998) “Pensar Socialmente é Bom e dá Lucro”. Qualidade na Construção, ano 1 no 6. São Paulo: SINDUSCON/SP.
- ANP (2005) Resolução ANP Nº 19, de 11.7.2005 DOU 12.7.2005. Regulamento técnico Nº 3/2005. Agência Nacional do Petróleo.
- APRG (1997) *Selection and Design of Asphalt Mixes: Australian Provisional Guide*. Austroads APRG Report Nº 18 published May 1997, updated 1998 and March 1999 ARRB Transport Research.
- ARAGÃO, W.M. (2002) Coco: Pós-Colheita. Série Frutas do Brasil. Brasília: Embrapa.
- ARAÚJO, A.M.; BRÍGIDA, A.I.S.; ROSA, M.F.; CRISÓSTOMO, L.A.; FIGUEIRÊDO, M^a. C. B.; PINTO, G. A. S (2004) Potencial de aproveitamento do líquido da casca de coco verde. *In: 50a Reunión de la Sociedad Interamericana de Horticultura Tropical, La Mercedes de Guácimo*. Programa y Resúmenes. 50a Reunión de la Sociedad Interamericana de Horticultura Tropical.
- ARTESP (2007) Agência de Transportes do estado de São Paulo. Disponível em: <http://www.artesp.sp.gov.br>. Acessado em 10/01/2007.
- ASBRACOCO (2006) Associação de Produtores de Coco. Disponível em: <http://www.portaldoagronegocio.com.br>. Acessado em 20/12/06.
- ASPHALT INSTITUTE (2001) *Superpave Mix Design*. Superpave Series Nº2 (SP-2), Third Edition, USA.
- ASSIS, J. S.; RESENDE, J. M.; SILVA, F. O.; SANTOS, C. R.; NUNES, F. (2000) Técnicas para colheita e pós-colheita do coco verde. Petrolina: Embrapa.
- ASTM – American Society for Testing and Materials (1939) *D 103 – Specification for Asphalt Cement, 100 to 120 Penetration, for Use in Asphalt-Macadam Pavements*.
- ASTM – American Society for Testing and Materials (1988) *C 127 – Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Coarse Aggregate*.

- ASTM – American Society for Testing and Materials (1997) *C 128 – Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Fine Aggregates.*
- ASTM – American Society for Testing and Materials (1998) *C 1252 – Standard Test Method for Uncompacted Void Content of Fine Aggregate (as Influenced by Particle Shape, Surface Texture, and Grading).*
- ASTM – American Society for Testing and Materials (1999) *D 113 – Standard Test Method for Ductility of Bituminous Materials.*
- ASTM – American Society for Testing and Materials (1999) *D 4791 – Standard Test Method for Flat Particles, Elongated Particles, or Flat and Elongated Particles in Coarse Aggregate.*
- ASTM – American Society for Testing and Materials (2000) *D 2041 – Standard Test Method for Theoretical Maximum Specific Gravity and Density of Bituminous Paving Mixtures.*
- ASTM – American Society for Testing and Materials (2001) *D 2042 – Standard Test Method for Solubility of Asphalt Materials in Trichloroethylene.*
- ASTM – American Society for Testing and Materials (2001) *D 2042 – Standard Test Method for Solubility of Asphalt Materials in Trichloroethylene.*
- ASTM – American Society for Testing and Materials (2003) *C 231 – Standard Test Method for Air Content of Freshly Mixed Concrete by the Pressure Method.*
- ASTM – American Society for Testing and Materials (2003) *E 102 – Standard Test Method for Saybolt Furol Viscosity of Bituminous Materials at High Temperatures.*
- ASTM – American Society for Testing and Materials (2004) *D 4867 – Standard Test Method for Effect of Moisture on Asphalt Concrete Paving Mixtures.*
- ASTM – American Society for Testing and Materials (2004) *D 2872 – Standard Test Method for Effect of Heat and Air on a Moving Film of Asphalt (Rolling Thin-Film Oven Test).*
- ASTM – American Society for Testing and Materials (2005) *D 2726 - Standard Test Method for Bulk Specific Gravity and Density of Non-Absorptive Compacted Bituminous Mixtures.*
- ASTM – American Society for Testing and Materials (2005) *D 92 – Standard Test Method for Flash and Fire Points by Cleveland Open Cup Tester.*
- ASTM – American Society for Testing and Materials (2005) *D 4791 - Standard Test Method for Flat Particles, Elongated Particles, or Flat and Elongated Particles in Coarse Aggregate.*

- ASTM – American Society for Testing and Materials (2006) *D 5 – Standard Test Method for Penetration of Bituminous Materials.*
- ASTM – American Society for Testing and Materials (2006) *D 36 – Standard Test Method for Softening Point of Bitumen (Ring-and-Ball Apparatus).*
- ASTM – American Society for Testing and Materials (2006) *D 4402 – Standard Test Method for Viscosity Determination of Asphalt at Elevated Temperatures Using a Rotational Viscometer.*
- ASTM – American Society for Testing and Materials (2006) *D 4402 – Standard Test Method for Viscosity Determination of Asphalt at Elevated Temperatures Using a Rotational Viscometer.*
- ASTM – American Society for Testing and Materials (2006) *D 5581 - Standard Test Method for Resistance To Plastic Flow of Bituminous Mixtures Using Marshall Apparatus (6 Inch-Diameter Specimen).*
- ASTM – American Society for Testing and Materials (2007) *D 1075 – Standard Test Method for Effect of Water on Compressive Strength of Compacted Bituminous Mixtures.*
- ASTM – American Society for Testing and Materials (2007) *C 127 - Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Fine Aggregate.*
- BALBO, J. T. (1997) *Pavimentos Asfálticos: Patologias e Manutenção.* 1ª Edição. São Paulo, Plêiade.
- BARAT J. (1978) *A evolução dos transportes no Brasil.* Rio de Janeiro: FIBGE/IPEA/
- BELIGNI, M. (2000) *Misturas Asfálticas do Tipo SMA (Stone Mastic Asphalt): Solução para Revestimentos de Pavimentos de Rodovias e Vias Urbanas de Tráfego Pesado. 1º Simpósio Internacional de Manutenção e Restauração de Pavimentos e Controle Tecnológico.*
- BERNUCCI, L. B.; MOTTA, L. M. G.; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B. (2006) *Pavimentação Asfáltica – Formação Básica para Engenheiros.* Rio de Janeiro: PETROBRAS, ABEDA.
- BOLZAN, P. E. (2000) *Stone Mastic Asphalt and Micro-SMA. As Premium Overlay Asphalt Mixtures on the Ricchieri Highway in Argentina.*
- BONDAR, G. (1954) “A cultura do coqueiro no Brasil”. *Boletim da Secretaria da Agricultura, Indústria e Comércio do Estado da Bahia*, no 50, vol. 14. Salvador.
- CARNEIRO, F.L. (1953) *Um Novo Método para a Determinação da Resistência à Tração dos Concretos.* Comunicação 5. Reun. Ass. Bras. Normas Técnicas.

Publ. Inst. Nac. Tecnol., Rio de Janeiro. Publicado no boletim nº13, RILEM, série antiga. Paris, 1953, p. 103-107.

CARRIJO, O.A.; LIZ, R.S.; MAKISHIMA, N (2002) Fibra da casca do coco verde como substrato agrícola. *Horticultura Brasileira*, Brasília, v. 20, n. 4, p. 533-535.

CARRIJO, O. A.; REIS, N. V. B.; MAKISSHIMA, N.; MOITA, A. W. (2001) Avaliação de Substratos e Casca de Vegetação para Cultivo de Tomateiro na região de Brasília. *Horticultura Brasileira*. 41º Congresso Brasileiro de Olericultura, Brasília/DF.

CASTELO BRANCO, V.T.F. (2004) *Caracterização de Misturas Asfálticas com o Uso de Escória de Aciaria como Agregado*. Tese de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ.

CASTRO NETO, A. M. (1996) Determinação da Densidade Máxima Teórica de Misturas Betuminosas. 30ª Reunião Anual de Pavimentação, ABPv, Salvador, v. 1, p. 35-60.

CNT (2006) Pesquisa Rodoviária CNT 2006. Relatório Gerencial, Confederação Nacional do Transporte, Pesquisa Internet. Site: <http://www.cnt.org.br>, acessado em 25 de junho de 2006.

COELHO, V.; SÓRIA, M.H.A. (1995) Influência da Granulometria e da Temperatura nas Deformações Permanentes das Trilhas-de-Roda. 29ª Reunião Anual de Pavimentação, ABPv, Cuiabá, v.2, p.402-431.

COELHO, M. A. Z. (1993) Purificação da poligalacturonase produzida por *Aspergillus niger* 3T5B8. Dissertação de Mestrado. Rio de Janeiro: EQ/UFRJ.

COELHO, M. A. Z.; LEITE, S. G. F.; ROSA, M. F.; FURTADO A. A. L. (2001) "Aproveitamento de resíduos agroindustriais: produção de enzimas a partir da casca de coco verde". Boletim CEPPA, nº 1, vol. 19. Curitiba.

CUNHA, R. T. (1999) Aplicação de enzimas em processos industriais têxteis. Monografia de Pós-Graduação. Rio de Janeiro: EQ/UFRJ.

DNER - Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (1987) ME 117 – *Mistura Betuminosa – Determinação da densidade aparente*.

DNER - Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (1994) ME 133 *Misturas Betuminosas – Determinação do Módulo de Resiliência*.

DNER - Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (1994) ME 138. *Misturas Betuminosas – Determinação da Resistência à Tração por Compressão Diametral*.

DNER - Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (1994) ME 78 – *Agregado graúdo – Adesividade a ligante betuminoso*.

- DNER - Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (1995) *ME 43 – Misturas Betuminosas a Quente – Ensaio Marshall.*
- DNER - Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (1995) *ME 84 – Agregado Miúdo – Determinação da densidade real.*
- DNER - Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (1996) *ME 193 – Materiais betuminosos líquidos e semi-sólidos – Determinação da densidade e da massa específica.*
- DNER - Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (1998) *ME 81 – Agregados – Determinação da absorção e da densidade de agregado graúdo.*
- DNER - Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (1998) *ME 83 – Agregados – Análise granulométrica.*
- DNER - Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (1998) *ME 35 – Agregados – Determinação da abrasão Los Angels*
- DNER - Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (1998) *ME 194 – Agregados – Determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco Chapman.*
- DNIT – Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes (2006) *ME 31 – Pavimentos Flexíveis – Concreto Asfáltico.*
- EAPA (1998) *Heavy Duty Surfaces: The Argument for SMA.* European Asphalt Pavement Association – EAPA, Holanda.
- EAPA (2004) *Heavy Duty Surfaces: The Argument for SMA.* European Asphalt Pavement Association – EAPA, Holanda.
- EMBRAPA (2006) Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Coco Verde. Disponível em: <http://www.embrapa.br>. Acessado em 20/12/06.
- EMERY, J. J.; SCHENK, W.; CARRICK, J. J.; DAVIDSON, J. K.; MACINNIS, W. K.; KENNEPOHL, G. J. A. (1996) Stone Mastic Asphalt Trials in Ontario. *77th Transportation Research Record, USA.*
- EMPRESA J. RETTENMAIER LATINOAMERICANA LTDA (2007) Fibras Naturais. Avenida Nações Unidas, 18.001. São Paulo/SP – Brasil.
- ESMERALDO, M. A. (2006) *Preparação de Novos Compósitos Suportados em Matriz de Fibra Vegetal/ Natural.* Dissertação de Mestrado, Programa de Mestrado em Química Orgânica, UFC, Fortaleza/CE - Brasil.
- EPPS, J.A.; SEBAALY, P.E.; PENARANDA, J.; MAHER, M.R.; McCANN, M.B.; HAND, A.J. (2000) *Compatibility of a Test for Moisture-Induced Damage with*

Superpave Volumetric Mix Design. NCHRP Report 444. Transportation Research Board, National Research Council, Washington, DC.

- FERREIRA, A. B. H. (1999) Dicionário da Língua Portuguesa. Rio de Janeiro, 3ª Edição.
- FHWA (1994) An Overview of Surface Rehabilitation Techniques for Asphalt Pavement – Instructor`s Guide – FHWA – AS – 94 – 074.
- FRANCKEN, L. e A. VANELSTRAETE (1995) SMA en Belgique: um revêtement pour l`avenir. XIIe Journée du Betume. Bélgica.
- FRANCO, C.A.; LEE, K.W. (1990) Development of the Pressure Method for Determining Maximum Theoretical Specific Gravity of Bituminous Paving Mixtures. *Transportation Research Record 1269*, National Research Council, Washington, DC.
- GOUVEIA, L.T.; FERNANDES JR., J.L. (2002) Limitações do Ensaio de Angularidade do Agregado Fino (FAA) para Previsão do Comportamento de Misturas Asfálticas. *XVI Congresso Nacional de Pesquisa e Ensino em Transportes, ANPET*, Natal, v.1, p. 157-168.
- GOUVEIA, L.T. (2006) Contribuições ao Estudo da Influência de Propriedades de Agregados no Comportamento de Misturas Asfálticas Densas. Dissertação de Doutorado, USP, São Carlos, SP, Brasil.
- GUEDES, L.O.; VILLELA, P.S. (2000) O mercado do coco. Belo Horizonte: INFOAGRO/FAEMG.
- HEIDE, J.P.J.; NICHOLLS, J.C. (2003) Harmonized European Test Methods. Performance Testing and Evaluation of Bituminous Materials. *PTEBM'03 Proceedings of the 6th International RILEM Symposium*.
- HORST E (2000) Stone Mastic Asphalt – Pavement Techonology. In: Anais do 15º Encontro de Asfalto, artigo IBP620_00. Rio de Janeiro, Brasil
- INSTITUTO DE ASFALTO (2001) Tradução do Manual de Asfalto. Série do Manual n°. 4 (MS-4), Edição 1989, Instituto de Asfalto.
- INSTITUTE OF INTERAMERICAN AFFAIRS (1954a) *Brazilian technical studies*. — Washington, DC: Joint Brazil-US Economic Development Comission.
- JOOSTE, F.J.; TAUTE, A.; VERHAEEGHE, B.M.J.A.; VISSER, A.T.; MYBURGH, O.A. (2000) A new hot mix desing method for Sourthen Africa. *World of Asphalt Pavements Conference, Sidney*, Australia.
- KANDHAL, P.S.; KOEHLER, W.S. (1985) Marshall Mix Design Method: Current Practices. *Proceeding Association of Asphalt Pavement Technologists Technical Sessions*, San Antonio, Texas, USA, v. 54.

- KANDHAL, P.S.; KHATRI, M.A. (1990) Improved Rice Method for Determining Theoretical Maximum Specific Gravity of Asphalt Paving Mixtures. *Transportation Research Record 1269*, National Research Council, Washington, DC.
- LANCHAS, S. (1999) Características del Stone Mastic Asphalt SMA. *Anais do Congresso Ibero-Latinoamericano – 10º CILA*, Sevilha, Espanha, v. 1, p. 727-730.
- LEAHY, R.B.; McGENNIS, R.B. (1999) Asphalt Mixes: Materials, Design and Characterization. *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, v. 68A, p. 70-127.
- MACKENZIE, R. C. (1979) Termochim. ACTA, 28.
- MANUAL DE ASFALTO (1989) Instituto de Asfalto. Série do Manual N° 4 (MS-4).
- MEDINA, J.; MOTTA, L. M.G. (2005) Mecânica dos Pavimentos. 2ed. Rio de Janeiro. Editora UFRJ, 2005. 574P.
- MIRANDA-STALDER, S.H.G.; BURNQUIST, H.L. (1996) “A importância dos subprodutos da cana-de-açúcar no desempenho do setor agroindustrial”. *Revista de Economia e Sociologia Rural*, no 3/4, vol. 34. Brasília.
- MOTTA, L.M.G.; TONIAL, I.; LEITE, L.M.F; CONSTANTINO, R.S. (1996) *Princípios do Projeto e Análise Superpave de Misturas Asfálticas*. Tradução comentada, Rio de Janeiro, RJ.
- MOTTA, L.M.G. (1998) Contribuição para a Estimativa do Módulo Resiliente de Misturas Asfálticas. *14º Encontro de Asfalto*, IBP, Rio de Janeiro, RJ.
- MOURA, E. (2001) *Estudo do Efeito de Aditivos Químicos e da Cal como Melhoradores de Adesividade em Misturas Asfálticas Densas*. Tese de M.Sc., POLI/USP, São Paulo, SP.
- MOURÃO, F.A.L. (2003) *Misturas Asfálticas de Alto Desempenho Tipo SMA*. Tese de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ.
- MURRAY, N. P. (2001). Caracterización y evaluación agronómica del residuo de fibra de coco: un nuevo material para el cultivo en sustrato. Tesis del Doctorales. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia.
- NAPA (1982) *Mix Design Techniques – Part I*. NAPA TAS-14. National Asphalt Pavement Association, Instructors Manual.
- NAPA (1999) National Asphalt Pavement Association, Quality Improvement Series 122. USA, Designing and Construction SMA Mixtures – State-of-the-Practice.

- NAPA (2002) Designing and Constructing SMA Mixtures – State of the Practice. Quality Improvement Series 122. National Asphalt Pavement Association, EUA.
- NCHRP (1999). *National Cooperative Highway Research Program, Designing Stone Matrix Asphalt Mixtures for Rut-Resistant Pavements*, Part 1 and Part 2, Report 425, Transportation Research Board, National Research Council, Washington D. C.
- PANK, H. (1995) Finnish Asphalt Specifications. Finnish Pavement Technology Advisory Council.
- PANNIRSELVAM P.V. (2000) Computer Aided and Economic Analyses of Integrated Microbial Process for Fiber, Feed and Fertilizer Production from Sisal Biomass Residuaes. *I Simpósio Internacional de Engenharia Têxtil - SIENTEX*, Natal/RN.
- PERDRAZA, G. D. (1999) Pavimentos Tipo SMA com la Adicción de Granulado de Fibra de Celulose Recobiertos com Asfalto o Bitumen. La experiência em México. *10º Congresso Ibero-Latinoamericano del Asfalto*. Vol II, p723 – 726, Novembro, Sevilla, Espanha.
- PINTO, S.; MOTTA, L. M. G. (1995) Catálogo de Curvas de Fadiga. Boletim Técnico Nº16, Associação Brasileira de Pavimentação – ABPv. Rio de Janeiro.
- PINTO, S.; PREUSSLER, E.S. (2002) Pavimentação Rodoviária. Conceitos Fundamentais sobre Pavimentos Flexíveis. 2ª Edição. Rio de Janeiro: Copiarte.
- REIS, R.M.M.; BERNUCCI, L.L.B.; ZANON, A. L. (2001a) Capítulo 9 Revestimento Asfáltico tipo SMA para Alto desempenho em Vias de Tráfego pesado. *In: Associação Nacional de Pesquisa e Ensino em Transportes; Confederação Nacional do transporte. (Org.). Transporte em transformação VI*. 1 ed. Brasília, v. 6, p. 163-176.
- REIS, R.M.M.; BERNUCCI, L.B.; ZANON, A.L. (2001b) “Revestimento Asfáltico Tipo Sma Para O Alto Desempenho em Vias de Tráfego Pesado”. *XX Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes – XX ANPET*, Campinas/SP, 2001.
- REIS, R. M. I. M (2002) *Revestimento Asfáltico Tipo SMA para Alto Desempenho em Vias de Tráfego Pesado*. Tese de M. Sc., EPUSP-USP, Brasil.
- RICE, J. M. (1953) New Test Method for Direct Measurement of Maximum Density of Bituminous Mixtures Crushed Stone Journal.
- ROBERTS, F. L.; KANDHAL, P. S.; BROWN, R. E.; LEE, D.; KENNEDY, T. W. (1996) *Hot Mix Asphalt Materials, Mixture Design, and Construction*. NAPA. Maryland, USA.

- ROCHA, E. C. & GHELER Jr., J. (2000) “Aproveitamento de resíduos gerados na aglomeração de fibra de coco com látex natural”. Matéria Técnica SENAI. Rio de Janeiro.
- ROSA, M. F.; SANTOS, F. J. S.; MONTENEGRO, A. A. T.; ABREU, F. A. P.; CORREIA, D; ARAÚJO, F. B. S.; NORÔES, E. R. V. (2001) Caracterização do pó da casca de coco verde usado como substrato agrícola. EMBRAPA – Fortaleza/CE.
- ROSA, M. F. (2002) Alternativas para o uso da casca de coco verde. Rio de Janeiro: Embrapa.
- ROSA, M. F.; ARAÚJO, A. M.; CRISÓSTOMO, L. A.; FIGUEIRÊDO, Ma. C. B.; CUNHA, E. A (2004) Avaliação do potencial de aproveitamento do líquido da casca de coco verde. *In: Encontro de Iniciação Científica da Embrapa Agroindústria Tropical*, Fortaleza/CE.
- SAVASTANO Jr., H. (2000) Materiais à base de cimento reforçados com fibra vegetal: Reciclagem de resíduos para a construção de baixo custo. Tese de Livre Docência. São Paulo: USP.
- SILVA, F. A. (2004) *Tenacidade de materiais compósitos não-convencionais*. Dissertação de Mestrado. Rio de Janeiro: PUC, Departamento de Engenharia Civil.
- SIMÕES, R. (2002) “Coco tem aproveitamento integral”. Agencia Brasil. Salvador/BA.
- SCHNIEDLIN, R. B. (1999) Stone Mastic Asphalt – The Wisconsin Experience. *80th Transportation Research Board*, USA.
- SCHMITT, R. L.; HANNA, A. S.; RUSSEL, J. S.; NORDHEIM, E. V. (1997) Pavement Density Measurement Comparative Analysis using Core and Nuclear Methods. *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, v. 66, p. 379-406.
- SLATER, K.; PHILLIPS, P.; WOODSIDE, A. R.; WOODWARD, W. D. H. (1996) Assessing the Performance of SMA as a Surfacing in an Urban Environment. *Euroasphalt & Eurobitume Congress*.
- SHRP (1994) The Superpave Mix Design Manual for New Construction and Overlays – SHRP-A407. Strategic Highway Research Program. National Research Council, Washington DC, USA.
- SOARES, J.B.; FREITAS, F.A.C.; CASTELO BRANCO, J.V.; MOTTA, L.M.G. (2000) Método de Previsão do Teor Ótimo de Ligante em Misturas Asfálticas tipo CBUQ. *32^a Reunião Anual de Pavimentação*, ABPv, Brasília/DF, v. I, p. 148-160.

- SOLAMANIAN; M.; HARVEY, J.; TAHMORESSI, M.; TANDON, V. (2004) Test Method to Predict Moisture Sensitivity of Hot-Mix Asphalt Pavements. Topic 3. http://trb.org/publications/conf/reports/moisture/03_TOP3.pdf, em 28/11/2004
- SOUZA, A. C. V. (1997) *Custos de Conservação de Rodovias, Velocidades de Tráfego e Módulos de Resiliência de Misturas Asfálticas*. Tese de D.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro/RJ, Brasil.
- VALE, A. C.; PINTO, I. C.; SOARES, J. B.; DANTAS NETO, S. A. (2006a) Estudo Laboratorial da Viabilidade do Uso de Fibras de Coco em Misturas Asfálticas do Tipo SMA. In: *Anais do 18º Encontro de Asfalto*, artigo IBP0049_06. Rio de Janeiro/RJ, Brasil.
- VALE, A. C.; PINTO, I. C.; SOARES, J. B.; DANTAS NETO, S. A. (2006b) Estudo do Efeito da Possível Degradação Térmica das Fibras de Coco Utilizadas em Misturas Asfálticas do Tipo SMA. *XX Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes – XX Anpet*, Brasília/DF, 2006.
- VALLE, C. E. (1995) *Qualidade ambiental: como ser competitivo protegendo o meio ambiente*. São Paulo: Pioneira.
- VALLEJO, S. (2005) *Agricultura e pecuária. Sistema Brasileiro de Respostas Técnicas – SBRT*. Rio de Janeiro, Brasil.
- VASCONCELOS, K. L.; SOARES, J. B. (2003a) Influência dos métodos de ensaio para determinação das densidades real e aparente de agregados na dosagem de misturas asfálticas. *34ª Reunião Anual de Pavimentação, ABPv*, Campinas/SP.
- VASCONCELOS, K. L.; SOARES, J. B.; LEITE, L. M. (2003b) Influência da Densidade Máxima Teórica na Dosagem de Misturas Asfálticas. *XVII Congresso Nacional de Pesquisa e Ensino em Transportes, ANPET*, Rio de Janeiro/RJ, v. 1, p. 5-17.
- VASCONCELOS, K. L. (2004) *Comportamento Mecânico de Misturas Asfálticas à Quente Dosadas pelas Metodologias Marshall e Superpave com Diferentes Granulometrias*. Dissertação de Mestrado, Programa de Mestrado em Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE, 149 fl.
- VENKATARAMAN, M. V.; RANGASWAMY, V. S. (1988) “Utilisation of coir pith and coconut shell”. *Indian Coconut Journal*, no 5, vol. 19.
- VIDAL, J. A. V. (2003) “La estopa de coco: Nueva materia prima para la industria papelera”. AUPEC. Colombia: Univalle, s.d.
- WOODMAN, C.; BURLIE, R.; EMERY, J. (1997) *Stone Mastic Asphalt Technology for Urban Pavements*. XIII International Road Federation World Meeting, nº 418-E, Toronto, Ontario, Canadá.

WYTHE, G. (1968) *Brazil, an expanding economy*. 2a ed.. New York: Greenwood Press Publishers.

XIN, S. – The Application of PMB & SMA Technology in Airport Runway of CAAC (1998) Proceedings of 3^o *International Conference on Road & Airfield Pavement Technology*. Volume 1. Beijing, China.

ZTV Asphalt – StB 94 (1998) Especificações de Serviço para Asfalto. Alemanha.