



UFAM

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS
FACULDADE DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE
RECURSOS DA AMAZÔNIA (PPG-ENGRAM)**



**DESEMPENHO MECÂNICO DE MISTURAS ASFÁLTICAS DO TIPO
STONE MATRIX ASPHALT COM USO DE FIBRAS AMAZÔNICAS E
AGREGADOS DE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO**

PATRICIA DE MAGALHÃES ARAGÃO VALENÇA

Manaus
2012

PATRICIA DE MAGALHÃES ARAGÃO VALENÇA

**DESEMPENHO MECÂNICO DE MISTURAS ASFÁLTICAS DO TIPO
STONE MATRIX ASPHALT COM USO DE FIBRAS AMAZÔNICAS E
AGREGADOS DE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos da Amazônia, como requisito parcial para obtenção do Título de Mestre em Engenharia de Recursos da Amazônia, Área de Concentração Geotecnia.

Orientador (a): PROF. Dra. CONSUELO ALVES DA FROTA

Manaus
2012

Valença, Patricia de Magalhães Aragão

V152d Desempenho mecânico de misturas asfálticas do tipo *Stone Matrix Asphalt* com uso de fibras amazônicas e agregados de resíduos de construção e demolição / Patricia de Magalhães Aragão Valença. - Manaus: UFAM, 2012.

114 f.; il. color.

Dissertação (Mestrado em Engenharia de Recursos da Amazônia) — Universidade Federal do Amazonas, 2012.

Orientadora: Prof^a. Dra. Consuelo Alves da Frota

1. Pavimentos de asfalto 2. Materiais de construção – Reaproveitamento 3. Resíduos industriais 4. Fibras – Aplicações industriais I. Frota, Consuelo Alves da (Orient.) II. Universidade Federal do Amazonas III. Título

CDU 625.877:628.4.043043.3)

PATRICIA DE MAGALHÃES ARAGÃO VALENÇA

**DESEMPENHO MECÂNICO DE MISTURAS ASFÁLTICAS DO TIPO
STONE MATRIX ASPHALT COM USO DE FIBRAS AMAZÔNICAS E
AGREGADOS DE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos da Amazônia, como requisito parcial para obtenção do Título de Mestre em Engenharia de Recursos da Amazônia, Área de Concentração Geotecnia.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dra. Consuelo Alves da Frota, Ph. D. – Orientador (a)
Universidade Federal do Amazonas

Prof. Dra. Rita Moura Fortes – Examinador Interno
Universidade Presbiteriana Mackenzie

Prof. Dr. Walter Canales Sant'Anna – Examinador Externo
Universidade Estadual do Maranhão

Manaus
2012

A Deus, meu maior e melhor motivador!

AGRADECIMENTOS

Acima de tudo e de todos, agradeço a Deus por ter me guiado e me instrumentado por meio da sua palavra nas escolhas, nas tribulações e, não menos, nos momentos de alegria. E se não fosse por isso, com certeza, não teria alcançado a Sua vontade.

Mas, para isso, também pude contar com alguém que acredita mais no meu potencial que eu mesma, e que assim nunca duvidou do que eu poderia alcançar. Apoio, Compreensão, Amor... poucas palavras para resumir enorme dedicação do meu marido em acreditar nos nossos sonhos. “Amo ∞”.

Inspiração... Agradeço aqueles que por meio das suas atitudes, de certa forma contribuíram para que eu fosse o que eu sou hoje, determinada a buscar honestamente o melhor caminho para minha vida com a educação... à minha família meu carinho: pri, polinha, mainha e painho.

Exemplo... Agradeço a uma pessoa especialmente colocada em minha vida, para que eu pudesse aprender a engrandecer minhas opiniões sem esquecer o relacionamento humano, mas também pelas suas “perfumarias” em meus artigos e trabalhos que muito os enobreceram. E muito mais que isso, com ela aprendi que dedicação é amor sem medidas... minha professora Consuelo Frota.

Parceria... Nada no mundo se conquista sozinho. Pessoas que cruzaram meu caminho e muito contribuíram para o meu conhecimento e minha personalidade — integrantes e ex-integrantes do Grupo de Geotecnia da UFAM (Ana Paula, André, Bárbara, Bruno, Cleudinei, Daiana, Daniela, Helena, Jéssica, Lidici, Lourdes, Marcos, Pedro, Rayglon, Reginaldo, Tayana), a mãe postiça dos membros do GEOTEC (Dona Mary), ao ajudante no laboratório Chico, aos colegas das turmas do ENGRAM de 2010.2 a 2011.1, ao secretário (Maurício) e todos os docentes do ENGRAM, e Prof^o Dr. José Ferreira Silva pelas informações agrônomas para nossa Engenharia Civil.

Persistência... Tive a benção de contar com grandes e intensas contribuições que nenhum agradecimento seria suficiente para representar toda benevolência de duas pessoas que me ajudaram grandemente nessa longa caminhada institucional... Prof. Dr. Hidembergue Ordozgoith da Frota e Eng^o Marcos Raiker Printes Ferreira... nossa, muito obrigada por tudo!!

Gratidão... Gostaria de agradecer o Sr. Imar César de Araujo do Centro de Biotecnologia da Amazônia – CBA pela gentileza em proporcionar o uso das fibras de curauá nesta pesquisa, a Empresa Concrecycle Comércio de Materiais Reciclados para Construção Ltda por prover o agregado de RCD, a Petrobrás - REMAN pelo fornecimento do CAP e a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES pela bolsa-auxílio que me permitiu executar este projeto.

Presente... Como não lembrar dos amigos do Colégio Nóbrega, Escola Politécnica de Pernambuco – POLI/UPE e da Universidade Nilton Lins, sempre com tanto carinho, longe ou perto, se fazem presentes em minha vida. Agradeço também aos meus amigos de orações (são tantos que não poderia citar somente alguns), um dos maiores presentes que ganhei de Manaus, esta dissertação é fruto das nossas orações!!

E gostaria de agradecer imensamente a compreensão dos professores Dra. Rita Moura Fortes e Dr. Walter Canales Sant’Anna, ambos sempre com muito carinho conosco, por aceitaram o convite para participar da bancada desta dissertação, em meio aos seus afazeres em um período tão conturbado do ano.

*“Confie em Deus de todo coração e não no seu próprio entendimento”
(Provérbios 3:5)*

RESUMO

O desenvolvimento da infraestrutura rodoviária no Brasil, aliado aos investimentos na indústria automobilística na década de 60, impulsionou, anos mais tarde, a necessidade de implantar sistemas administrativos públicos e privados em tais rodovias, a fim de manter boas condições de tráfego e segurança. Por outro lado, o Município de Manaus compunha-se de um histórico de problemas geotécnicos, como os custosos processos de obtenção de material pétreo devido às espessas camadas de solos finos que recobrem os horizontes rochosos em conjunto com as dificuldades logísticas para seu transporte. Tais fatos, de âmbito nacional e regional, suscitaram o estudo de misturas asfálticas de melhor desempenho mecânico, segundo a literatura científica, relativa às misturas convencionalmente utilizadas, por exemplo, Concreto Asfáltico. Trata-se de misturas descontínuas com excelentes experiências, mormente nas estradas européias, denominadas de *Stone Matrix Asphalt*. O SMA se caracteriza pelo alto percentual de agregados graúdos, o que favorece o escoamento do mástique asfáltico. Para reduzir tal efeito, adicionaram-se fibras amazônicas do curauá, que são largamente produzidas na região norte do Brasil e caracterizadas pela alta resistência mecânica, contudo com maior aplicação em compósitos automotivos. Em complemento, para viabilizar o uso deste tipo de revestimento betuminoso em virtude do elevado partícipe de materiais graúdos, analisou-se o desempenho de um agregado reciclado (Resíduos de Construção e Demolição – RCD) comparativamente a um agregado granítico tradicional. Neste panorama, realizou-se caracterização física e mecânica dos materiais partícipes e da mistura SMA. Acerca dos agregados, o RCD alcançou 160% a mais de desgaste por abrasão *Los Angeles*, satisfatória adesividade e menores densidades aparentes e saturadas em confronto com a brita. Concernente à mistura mineral, enquadrou-se 75% de graúdos, 15% de miúdos e 10% de fíler nas especificações descritas pela *National Asphalt Pavement Association* (NAPA). Ao inferir um volume de vazios de 4%, atendendo aos requisitos dos vazios da fração graúda do agregado na mistura compactada maior que os vazios da fração graúda do agregado compactado, obtiveram-se iguais teores de projeto de CAP se realizado a dosagem do tipo *Marshall*, sendo 6,28% (SMA com brita), 6,82% (SMA com RCD), 6,50% (SMA com brita e urauá) e 6,88% (SMA com RCD e curauá). Referente ao escoamento, as fibras do curauá reduziram tal efeito com apenas 0,3% de fibras em ambos compósitos asfálticos. Atinente a Resistência a Tração realizada a 25°C, 40°C e 60°C, os compósitos com RCD obtiveram melhores resultados, porém a inserção da fibra minorou os valores possivelmente pela perda da sua rigidez com o detrimento da sua água adsorvida. No entanto, no Módulo de Resiliência executado a 25°C e 40°C, em geral, as fibras contribuíram para o comportamento mecânico, sobretudo a mistura com brita e temperatura de 40°C. Relativo ao aumento da temperatura, ambos os ensaios mecânicos possuíram o decréscimo de seus resultados, mas com menores perdas para o agregado reciclado. Nesta perspectiva, assume-se um bom desempenho do agregado reciclado nas misturas SMA, com resultados positivos na adição das fibras do curauá particularmente quanto à resiliência do material.

Palavras-chave: *Stone Matrix Asphalt*, Resíduo de Construção e Demolição, Fibra do Curauá, Resistência a Tração, Módulo de Resiliência.

ABSTRACT

The development of road infrastructure in Brazil, coupled with investments in the automotive industry in the 60s, boosted, years later, the need to implement public and private administrative systems on these roads, in order to maintain good traffic conditions and safety. Moreover, Manaus county has a history of geotechnical problems, such as the costly process of obtaining stone material, due to the thick layers of fine soil overlying rocky horizons and the complicated logistics of its transportation. These facts, on both national and regional levels, have led to the study of asphalt mixtures with improved mechanical performance, according to the scientific literature on commonly used mixtures, for example, Asphalt Concrete. These are discontinuous mixtures with excellent experience, especially on European roads, called Stone Matrix Asphalt (SMA). SMA is characterized by a high percentage of coarse aggregate, which favors the draindown of mastic asphalt. To reduce this effect, fibers from the Amazonian curauá were added, which are largely produced in the northern region of Brazil and characterized by high mechanical resistance, although mainly applied in automotive composites. In addition, to enable the use of this type of bituminous coating due to the large proportion of coarse materials, we analyzed the performance of a recycled aggregate (Construction and Demolition Waste - CDW) compared to a traditional granite aggregate. In this scenario, there was physical and mechanical characterization of the component materials and of the SMA mixture. With respect to the aggregates, the CDW achieved 160% more Los Angeles abrasion, satisfactory adhesiveness and lower bulk and saturated densities when compared with brita. The mineral mixture, 75% coarse, 15% fine and 10% filler, fit the specifications described by the National Asphalt Pavement Association (NAPA). Inferring a void volume of 4%, meeting the requirements of the empty coarse fraction of the aggregate in the compacted mixture, larger than the empty coarse fraction of the compacted aggregate, similar levels were obtained for the CAP project if using Marshall type dosage, at 6.28% (for SMA with brita), 6.82% (for SMA with CDW), 6.50% (for SMA with brita and curauá) and 6.88% (for SMA with CDW and curauá). Draindown was effectively reduced by curauá fibers with only 0.3% fiber in both asphalt composites. With regard to traction resistance performed at 25 °C, 40°C and 60°C, the composite CDW obtained better results, but fiber insertion lowered the values, possibly by loss of rigidity due to the detriment of their adsorbed water. However, in the Resilience Modulus performed at 25°C and 40°C, in general, fibers contribute to the mechanical behavior, especially the mix with brita and the temperature at 40°C. Increased temperature caused decreased results in both mechanical tests, but the decrease was less in the recycled aggregate. In view of this, a good performance of the recycled aggregate is assumed in SMA blends, with positive results from the addition of curauá fibers particularly as to the resilience of the material.

Key-Words: Stone Matrix Asphalt, Construction and Demolition Waste, Curauá Fiber, Tensile Strength, Resilience Modulus.

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - Caracterização do Cimento Asfáltico de Petróleo	44
TABELA 2 - Faixas Granulométricas para misturas do tipo SMA.....	52
TABELA 3 - Definição da Fração Graúda do Agregado em relação ao Peso Total da Mistura (P_{CA})	59
TABELA 4 - Especificações para Mistura SMA confeccionadas no compactador Marshall	59
TABELA 5 - Especificações dos Protocolos para ensaio de Módulo de Resiliência.....	65
TABELA 6 - Caracterização do Ligante Asfáltico.....	70
TABELA 7 - Viscosidades e Parâmetros (após Envelhecimento) do Ligante Asfáltico	71
TABELA 8 - Densidade e Absorção dos Agregados	74
TABELA 9 - Densidade da Fibra do Curauá.....	77
TABELA 10 - Aferição do Teor de CAP para 4% de Volume de Vazios	81
TABELA 11 - VCA (<i>Voids in the Coarse Agggregate</i>) das misturas SMA	82
TABELA 12 - Teor “Ótimo” de Ligante Asfáltico	85
TABELA 13 - Resultado do ensaio de Escorrimento.....	88
TABELA 14 - Influência da Fibra nos Compósitos quanto a RT	91
TABELA 15 - Decréscimo da RT com a temperatura	92
TABELA 16 - Influência da Fibra nos Compósitos quanto ao MR com coeficiente de Poisson de 0,35	98

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - Rodovias no Estado do Amazonas: (a) Rodovia AM-010 e (b) Rodovia BR-174	19
FIGURA 2 - Stone Matrix Asphalt: (a) Comparação com a Mistura Densa Convencional e (b) Esquema do Esqueleto Pétreo	30
FIGURA 3 - Fibras Vegetais: (a) Sisal e (b) Coco	35
FIGURA 4 - (a) Plantação de Curauá Branco e Roxo, (b) Extração da Fibra da Folha do Curauá, (c) Fibras do Curauá processadas e (d) Secagem das Fibras do Curauá.....	37
FIGURA 5 - (a) Fibra do Curauá fornecida pelo Centro de Biotecnologia da Amazônia (CBA) e (b) Pontas da Fibra comumente descartadas pela Indústria	38
FIGURA 6 - Agregados de Resíduo de Construção e Demolição nas frações correspondentes à (a) Brita 1 e (b) Brita 0.....	41
FIGURA 7 - Fluxograma da Metodologia.....	43
FIGURA 8 - Classificação dos Agregados	45
FIGURA 9 - Equipamento Abrasão Los Angeles: (a) Tambor Rotativo, (b) Esferas Metálicas e (c) Contador de Rotações	48
FIGURA 10 - Fibra do Curauá: frações cortadas para uso na mistura asfáltica.....	50
FIGURA 11 - Determinação da Massa Específica da Fibra: (a) aquecimento para expulsão de ar e (b) pesagem do conjunto picnomêtro e amostra	50
FIGURA 12 - Ar presente no ensaio de massa específica pelo Frasco Chapman.....	51
FIGURA 13 - Ar presente no ensaio de massa específica pelo Frasco Le Chantelier	51
FIGURA 14 - Esquema da execução da mistura asfáltica SMA com a fibra do Curauá: mistura mineral (a) com Brita e (b) com RCD, (c) inserção das fibras, (d) mistura dos agregados e fibras, (e) pesagem do ligante asfáltico e (f) aspecto da mistura asfáltica.	53
FIGURA 15 - Limites Máximos e Mínimos Granulométricos para Mistura do tipo SMA ..	54
FIGURA 16 - Fluxograma Dosagem Marshall	55
FIGURA 17 - (a) Compactador Marshall, (b) Mistura compactada no molde Marshall e (c) Corpos de Prova para Dosagem da Mistura Sem Fibra.....	56
FIGURA 18 - Mistura Asfáltica SMA na Condição Solta para Ensaio de DMM.....	57

FIGURA 19 - Misturas Asfálticas SMA parafinadas na condição compactada para ensaio de Densidade Aparente.....	58
FIGURA 20 - Ensaio de Escorrimento após o Acondicionamento em Estufa.....	61
FIGURA 21 - Dosagem da Mistura SMA com Fibras	62
FIGURA 22 - Ensaio de Resistência à Tração no Equipamento UTM 14	63
FIGURA 23 - Software do Ensaio de Módulo de Resiliência: (a) Seleção do Protocolo, (b) Temperatura, (c) Tempo Pulso de Carga, (d) Tempo Ciclo de Carga e Descarregamento, (e) Número de Ciclos de Condicionamento, (f) Carga Aplicada e (g) Coeficiente de Poisson adotado.....	65
FIGURA 24 - Ensaio de Módulo de Resiliência: (a) Vista Geral e (b) Detalhe do Corpo de Prova no Ensaio	66
FIGURA 25 - Execução do MR a 40°C com 30% da RT obtida a 25°C	67
FIGURA 26 - Execução do MR a 40°C com 30% da RT obtida a 25°C	67
FIGURA 27 - Aspecto do Resultado Final do Ensaio de Módulo de Resiliência.....	68
FIGURA 28 - Gráfico Viscosidade Saybolt Furol do CAP.....	72
FIGURA 29 - Gráfico Viscosidade Brookfield do CAP	72
FIGURA 30 - Granulometria dos Agregados: Brita 1, RCD 1, Areia e Cimento <i>Portland</i> ..	73
FIGURA 31 – Esquema das Variações dos Resultados de Densidade Real, Aparente e Aparente na condição Saturada para Agregados Porosos e Pouco Porosos	74
FIGURA 32 - Ensaio de Abrasão da Brita 1: (a) Antes da rotação e (b) Após a rotação	75
FIGURA 33 - Ensaio de Abrasão do RCD 1: (a) Antes da rotação e (b) Após a rotação	75
FIGURA 34 - Ensaio de Adesividade do Agregado Graúdo: Antes do Ensaio — (a) Brita e (b) RCD e Depois do Ensaio — (a) Brita e (d) RCD	77
FIGURA 35 - Enquadramento Granulométrico da Dosagem Mineral (TMN 19,00mm)	78
FIGURA 36 - Massa Especifica Solta (Gmm) e Compactada (Gmb) dos Compósitos com: (a) BRITA, (b) BRITA-CURAUÁ, (c) RCD e (d) RCD-CURAUÁ	79
FIGURA 37 - Teor de Ligante Asfáltico x Volume de Vazios — (a) BRITA, (b) BRITA-CURAUÁ, (c) RCD e (d) RCD-CURAUÁ.....	80
FIGURA 38 - Dosagem do Teor de Ligante – Mistura SMA BRITA (sem Fibra).....	83
FIGURA 39 - Dosagem do Teor de Ligante – Mistura SMA RCD (sem Fibra).....	83

FIGURA 40 - Dosagem do Teor de Ligante – Mistura SMA BRITA (com 0,3% Fibra Curauá)	84
FIGURA 41 - Dosagem do Teor de Ligante – Mistura SMA RCD (com 0,3% Fibra Curauá)	84
FIGURA 42 – Seção dos Corpos de Prova na Dosagem Mineral selecionada e Teor “Ótimo” de CAP.....	85
FIGURA 43 - Ensaio de Escorrimento – Mistura SMA BRITA – 162,5°C: (a) 0%, (b) 0,3% e (c) 0,5% de fibra do curauá.....	87
FIGURA 44 - Ensaio de Escorrimento – Mistura SMA RCD – 162,5°C: (a) 0%, (b) 0,3% e (c) 0,5% de fibra do curauá.....	87
FIGURA 45 - Ensaio de Escorrimento – Mistura SMA BRITA – 177,5°C: (a) 0%, (b) 0,3% e (c) 0,5% de fibra do curauá.....	87
FIGURA 46 - Ensaio de Escorrimento – Mistura SMA RCD – 177,5°C: (a) 0%, (b) 0,3% e (c) 0,5% de fibra do curauá.....	88
FIGURA 47 - Ensaio de Resistência à Tração - Antes da Ruptura: Acondicionamento a (a) 40°C e (b) 60°C	90
FIGURA 48 - Ensaio de Resistência a Tração - Após a Ruptura: Medição da Temperatura Interna do Corpo de Prova para o Ensaio a (a) 40°C e (b) 60°C	90
FIGURA 49 - Ensaio de Módulo de Resiliência a 40°C - Medição da Temperatura do Corpo de Prova: (a) Externa antes do experimento e (b) Interna com abertura do CP após o experimento	90
FIGURA 50 - Resultados de Resistência à Tração, em MPa	91
FIGURA 51 - Análise da Resistência á Tração em função da temperatura, em MPa.....	92
FIGURA 52 - Aspecto do Corpo de Prova no Ensaio de Resistência á Tração a 60°C	93
FIGURA 53 - Módulo de Resiliência com aplicação de 5% da RT, em MPa	94
FIGURA 54 - Módulo de Resiliência com aplicação de 15%, em MPa	95
FIGURA 55 - Módulo de Resiliência com aplicação de 30%, em MPa	95
FIGURA 56 - Módulo de Resiliência a 25°C, em MPa	96
FIGURA 57 - Módulo de Resiliência a 40°C, em MPa	97
FIGURA 58 - Decréscimo do MR com a temperatura	97

LISTA DE ABREVIATURAS

- AASHTO - *American Association of State Highway and Transportation Officials*
- AAUQ - Areia-Asfalto usinada a Quente
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas
- ABRELPE - Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais
- An - Abrasão Los Angeles da Graduação n
- ANP - Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis
- AS - *Australian Standards*
- ASTM - *American Society for Testing and Materials*
- BSI - *British Standards*
- CA - Concreto Asfáltico
- CAP - Cimento Asfáltico de Petróleo
- CBA - Centro de Biotecnologia da Amazônia
- CBIC - Câmara Brasileira da Indústria da Construção
- cm - Centímetros (unidade de dimensão)
- CNT - Confederação Nacional de Transportes
- CO₂ - Gás Carbônico
- cP - Centipoise
- CPRM - Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais
- D - Diâmetro do Corpo de Prova
- Da - Densidade do CAP da Amostra
- DMM ou Gmm - Densidades Máxima Medida
- DNER - Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
- DNIT - Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
- D_{real} - Densidade Real do Agregado Miúdo
- EM - *Europeun Standards*
- Gca – Massa Específica Aparente da Fração Graúda do Agregado
- Gmb - Densidades Aparentes
- Gmb - Massa Específica Aparente da Mistura Compactada
- Gsa - Densidade Real do Agregado Graúdo
- Gsb - Densidade Aparente do Agregado Graúdo
- Gsbssd - Densidade Aparente na condição Superfície Saturada do Agregado Graúdo
- $\gamma_{agregado}$ - Massa Específica Agregado Graúdo
- γ_s - massa específica da fração graúda do agregado seco compactado
- γ_w - massa específica a da água

h - Média da Altura do Corpo de Prova
Hz - Hertz (unidade de frequência)
km - Quilômetros (unidade de dimensão)
LTPP - *Long Term Pavement Performance*
LVDT - *Linear Variable Differential Transducers*
mm - Milímetros (unidade de dimensão)
MPa - Megapascal (unidade de pressão/tensão)
MR - Módulo de Resiliência
NAPA - *Nacional Asphalt Pavement Association*
NCHRP - *National Cooperative Highway Research Program*
NI - Não informado
P - Carga Aplicada
PA - Pará
P_{CA} - Fração Graúda do Agregado em relação ao Peso Total da Mistura
PET - Polietileno Teriftalato
RBV - Relação Betume/Vazios
RCD - Resíduo de Construção e Demolição
REMAN - Refinaria Isaac Sabbá
RT - Resistência à Tração
RTFOT - *Rolling Thin Film Oven Test* - Estufa de Filme Fino Rotativo
s - Segundos
SHRP - *Strategic Highway Research Program*
SMA - *Stone Matrix Asphalt*
TMN - Tamanho Máximo Nominal
UTM 14 - *Universal Testing Machine* 14 Quilonewton
v - Coeficiente de Poisson
VAM - Vazios Agregado Mineral
VCA - *Voids in the Coarse Agggregate*
VCA_{DRC} - Vazios da fração graúda do agregado compactado
VCA_{MIX} - Vazios da fração graúda do agregado na mistura compactada
VCB - Vazios Cheios de Betume
V_V - Volume de Vazios
 σ_r - Valor da Resistência à Tração
%a - Teor de CAP da Amostra
 Δ - Deslocamento Medido
°C - graus Celsius

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	18
1.1. OBJETIVOS.....	23
1.1.1. Objetivo Geral.....	23
1.1.2. Objetivos Específicos.....	23
1.2. ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO.....	24
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	25
2.1. PAVIMENTO.....	25
2.1.1. Revestimento Asfáltico.....	26
2.2. STONE MATRIX ASPHALT.....	28
2.3. FIBRAS.....	33
2.3.1. Fibras de Curauá.....	36
2.4. AGREGADOS ALTERNATIVOS.....	39
2.5. ANÁLISE MECÂNICA.....	41
2.5.1. Mistura Asfáltica.....	41
3. METODOLOGIA.....	43
3.1. MATERIAIS.....	44
3.1.1. Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP).....	44
3.1.2. Agregados.....	45
3.1.3. Fibra do Curauá.....	49
3.2. MISTURA ASFÁLTICA SMA.....	51
3.3. DOSAGEM DA MISTURA ASFÁLTICA.....	54
3.3.1. Dosagem com Compactador Marshall.....	54
3.3.2. Dosagem da Fibra.....	60
3.4. ENSAIOS MECÂNICOS.....	62
3.4.1. Resistência à Tração.....	62
3.4.2. Módulo de Resiliência.....	64
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	70
4.1. CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS.....	70
4.1.1. Ligante Asfáltico.....	70
4.1.2. Agregados.....	72
4.1.3. Fibra do Curauá.....	77

4.2. DOSAGEM DA MISTURA ASFÁLTICA	78
4.2.1. Ensaio de Escorrimento.....	86
4.3. ENSAIOS MECÂNICOS	89
4.3.1. Resistência à Tração	90
4.3.2. Módulo de Resiliência.....	94
5. CONCLUSÕES	99
5.1. Caracterização do Ligante Asfáltico	99
5.2. Caracterização dos Agregados e Fibra do Curauá	99
5.3. Caracterização da Mistura SMA	100
5.4. Sugestões para Trabalhos Futuros	102
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	103

1. INTRODUÇÃO

Do ponto de vista histórico, a política de transportes no Brasil tem se pautado, em geral, pelos interesses econômicos externos, visando a contemplar o *lobby* da indústria automobilística estrangeira, motivo da ênfase no sistema modal de transporte rodoviário, desde a vinda, para o País, das multinacionais automobilísticas, durante o governo (1956-1961) desenvolvimentista de Juscelino Kubitschek de Oliveira (1902-1976).

A despeito de o Estado brasileiro, desde a segunda metade do século XX, ter priorizado o transporte rodoviário, revelam-se, paradoxalmente, ínfimos os investimentos governamentais destinados à manutenção e à recuperação da malha rodoviária nacional, circunstância agravada, em meados dos anos 1980, com a crise econômica e financeira da Nação, em virtude do exaurimento do milagre econômico da década de 1970, paralelo ao crescimento da dívida pública, do desemprego e da espiral inflacionária.

Nos anos 1990, ante as exigências internacionais de redução dos gastos públicos, ditadas por organismos internacionais, como o Fundo Monetário Internacional e o Banco Mundial, bem como pela difusão da ideologia neoliberal, sob o signo do chamado “Consenso de Washington”, catalisada pelo fim da Guerra Fria (1947-1991) e hegemonia dos Estados Unidos da América, na qualidade de principal motor da economia mundial e única superpotência nuclear remanescente, o Governo Federal repassou, de forma parcial, sob o regime de concessão, a administração das rodovias federais para a iniciativa privada (PEREIRA & LESSA, 2011).

Por outro lado, sob o ângulo do desenvolvimento da região amazônica, as cidades formaram-se pela ocupação de áreas próximas aos territórios onde, preferencialmente, comercializavam-se produtos como a canela, o cravo, o anil, as raízes aromáticas, as sementes oleaginosas e a salsaparrilha. Contudo, a partir do final do século XIX, a cidade de Manaus adquiriu maior importância política e econômica, em decorrência da construção de

seu porto flutuante, que realizava o intercâmbio entre as áreas produtoras da Amazônia Ocidental e a Europa.

Em 1852, com o desmembramento da Província do Grão-Pará e o consequente advento das Províncias do Pará e do Amazonas, Manaus, na qualidade de Capital da então recente Província amazonense, seria beneficiada por sensíveis melhorias na infraestrutura urbana, a exemplo da energia elétrica e do calçamento (TAVARES, 2011).

Estudos da Confederação Nacional de Transportes - CNT (2011) apresentam 58,45% das rodovias brasileiras com deficiências graves, ilustradas por trincas em malha (do tipo couro de jacaré), além de remendos e desgastes. Desse quantitativo, 88,23% são geridas pelo Poder Público e 11,77% por concessionárias.

Quanto ao Estado do Amazonas, o citado trabalho mostra que 63,1% dessas vias geridas pela Administração Pública apresentam as supracitadas patologias. Na Figura 1, exemplificam-se alguns dos principais defeitos normalmente presentes na mencionada Unidade da Federação, como trincas longitudinais na Rodovia AM-010 e erosão na Rodovia BR-174.



FIGURA 1 - Rodovias no Estado do Amazonas: (a) Rodovia AM-010 e (b) Rodovia BR-174
FONTE - Arquivo CNT (2011)

Ainda concernente ao Município de Manaus, GUIMARÃES (2009) noticia que as suas vias urbanas denotam características de prematura deterioração, como afundamento em trilha de roda, desgaste superficial, escorregamento do revestimento, panelas e trincas.

Informa, também, que, na camada asfáltica, ocorrem, sobretudo, defeitos oriundos de deformação plástica e fluência. No trabalho de CAVALCANTE *et al.* (2012), consigna-se, ainda, que os índices de serventia da metrópole em tela indicam resultados de regular a ruim, explicitando, assim, mais uma vez, a precária situação das ruas e avenidas manauenses.

Tal panorama decorre da associação das características geotécnicas regionais (mormente, a carência de afloramentos rochosos superficiais) e dos fatores logísticos à dispendiosidade das matérias-primas voltadas à confecção, por exemplo, de compósitos asfálticos.

Nesse sentido, é digno de nota o fato de que a jazida de brita mais próxima de Manaus encontra-se no Município de Presidente Figueiredo, a cerca de 180km de Manaus, comercializada a um custo majorado de 76%, em decorrência do expressivo custo de transporte.

No caso do seixo (material retirado dos rios amazônicos, a apresentar propriedades técnicas menos adequadas relativas ao agregado pétreo), embora seja vendido a um valor médio 20% menor que o da brita (CPRM, 1998), apresenta alto custo ambiental.

Sobre tais materiais, MELO (2009) ressalta que, além das desvantagens alusivas às propriedades técnico-econômicas, a brita igualmente mostra um processo de extração causador de profundos impactos ambientais, porquanto as explosões necessárias à extração dos blocos de rocha ocasionam expressiva vibração no substrato, lançam material pulverulento que se espalham rapidamente pelo ar, bem como afetam, de modo significativo, a paisagem. Logo, a utilização das mencionadas matérias-primas, pelo uso quer da brita (arenito ou de granito), quer do material aluvionar, acarreta agressões de vulto ao meio ambiente, razão por que se evidencia relevante o estudo de soluções alternativas, que proporcionem menores impactos, redução de custos e qualidade técnica.

Em paralelo, o desenvolvimento da infraestrutura urbana suscita o controle dos recursos naturais (finitos), necessários a sua construção e a descoberta de tecnologias para aplicabilidade de novos materiais.

Esse panorama é consequência, segundo PIZA & FACHÍN-TÉLAN (2009), da substituição da cultura de consumir o suficiente para a de consumo desenfreado, cuja grandeza e impacto da ação e da gestão humana assumiram tal proporção, que passaram a ameaçar a existência da fauna e da flora, muitas espécies já extintas, em virtude da incapacidade de resistir à velocidade de seu uso, abuso e degradação, ao passo que os recursos naturais continuaram passivos e lentos no seu processo de recuperação, reconstrução e reciclagem.

Ante o paulatino esgotamento dos recursos naturais, mostra-se, pois, prioritária a prática de construções sustentáveis.

Consoante relatam HUANG, BIRD & HEIDRICH (2007), na revisão sobre resíduos sólidos reciclados em misturas asfálticas, ponderam que, apesar do maior volume de uso dos agregados possa se concentrar na construção das camadas inferiores (base, sub-base, etc), os serviços de manutenção ou obras de reparação no revestimento asfáltico são predominantes. Em complemento, salientam que os custos do processamento de agregados reciclados justificam-se em aplicações de maior valor, caso do composto asfáltico.

Assim, essa nova política de revalorização da natureza, por meio da preservação ambiental, objetivando o desenvolvimento sustentável, também induz à busca por formas de aproveitamento total dos recursos naturais, caso da Amazônia, onde tem-se a extração dos subprodutos (óleos, sementes, fibras e polpas) que acarreta ao descarte de resíduos não aproveitados como matéria-prima na cadeia dos recursos naturais. A título exemplificativo mencionem-se os grumos de fibras naturais, desclassificadas no processo de utilização para reforço, bem como as cascas dos frutos para obtenção de óleo.

MARINELLI *et al.* (2008) enfocam a utilização de fibras naturais de origem vegetal, em razão da enorme variedade de plantas disponíveis na biodiversidade amazônica, passíveis de serem pesquisadas e fontes de recurso renovável, alternativas economicamente rentáveis e adequadas para a fixação de carbono na natureza (*verbi gratia*, os compósitos poliméricos com a presença de tais materiais).

Dessa maneira, reduz-se a emissão de gás carbônico — CO₂, para a atmosfera durante o seu ciclo de produção, processamento e utilização, além de se incrementar o seu potencial econômico, devido à possibilidade de comércio de créditos carbonos para a cadeia produtiva.

Nesse contexto, o meio técnico-científico vem estudando alternativas às matérias-primas naturais. Merece destaque as pesquisas concernentes aos agregados britados de resíduo de construção e demolição (RCD), com vistas à sua utilização, na qualidade de material de construção, em substituição à brita e/ou ao seixo, em locais longínquos dos afloramentos rochosos ou quando a ocorrência da matéria-prima (rochas) localiza-se em grandes profundidades no subsolo (caso do Município de Manaus).

Com efeito, neste trabalho, será estudada a mistura asfáltica do tipo *Stone Matrix Asphalt* – SMA, desenvolvida na Alemanha. Segundo ONOFRE *et al.* (2008), apresenta melhor comportamento relativo às misturas do tipo Concreto Asfáltico (CA) e Areia-Asfalto (AAUQ), mormente pela influência da granulometria com agregados grãos predominantes (intertravamento) na capacidade estrutural da referida camada.

Nesse sentido, segundo a literatura especializada (LANCHAS, 1999 apud MOURÃO, 2003; BROWN *et al.*, 1997; ASI, 2006; SUCHISMITA, 2009), compósitos do tipo Stone Matrix Asphalt (SMA), quando comparados ao tradicional Concreto Asfáltico (CA), possuem maior porcentagem de agregados grãos, formadores de uma estrutura compacta e entrelaçada a favorecer a dissipação do carregamento, mostrando resistência ao desgaste e à deformação permanente.

Por outro lado, compósitos dessa natureza possuem elevado teor de vazios, a suscitar a inclusão de fibras, visando a prevenir o escorrimento do mástique (agregados miúdos e ligante).

Diante desse cenário, pesquisa-se, nesta Dissertação, o desempenho mecânico de misturas asfálticas, utilizando resíduos industriais de matérias-primas extraídas da floresta amazônica e da construção civil, contribuindo para o melhoramento dos compósitos asfálticos regionais e o desenvolvimento de novos materiais, no contexto de uma alternativa técnica apropriada, sob o prisma não apenas tecnológico, econômico e industrial, como também ambiental.

1.1. OBJETIVOS

1.1.1. Objetivo Geral

Estudar o comportamento mecânico de um compósito asfáltico do tipo *Stone Matrix Asphalt* (SMA), assim como as propriedades físicas dos seus partícipes (ligante asfáltico, fíler, fibras e agregados), com destaque aos materiais oriundos de descartes industriais (resíduos de fibras naturais amazônicas e da construção civil).

1.1.2. Objetivos Específicos

- Caracterizar, fisicamente, as fibras, os agregados e o fíler.
- Comparar o desempenho mecânico dos compósitos asfálticos com o agregado alternativo (RCD) relativo às misturas asfálticas confeccionadas com o agregado tradicional (brita), com a presença, em ambos, da fibra de curauá.

- Apresentar a viabilidade técnica da incorporação da fibra de curauá na mistura asfáltica SMA.
- Estudar o comportamento mecânico da mistura asfáltica SMA, por meio dos ensaios de Resistência à Tração e Módulo de Resiliência.
- Comprovar a viabilidade técnica da mistura asfáltica SMA confeccionada com resíduos de construção e demolição (agregado graúdo), e a fibra de curauá.
- Contribuir com o desenvolvimento de alternativa apropriada sob a óptica não apenas tecnológica, econômica e industrial, mas também ambiental.

1.2. ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

O Capítulo 1 aborda o histórico do problema e os objetivos do presente estudo.

O Capítulo 2 apresenta uma revisão bibliográfica sobre o assunto, onde, particularmente, fundamenta-se o entendimento sobre o revestimento asfáltico do tipo *Stone Matrix Asphalt*, tema central da presente pesquisa. Neste citado capítulo, faz-se menção ao uso das fibras no SMA, a importância da implementação de agregados alternativos e, por fim, a análise mecânica para aferição do desempenho dos compósitos asfálticos.

No Capítulo 3 discutem-se os materiais utilizados na pesquisa e os métodos para avaliação destes, seja separadamente ou em conjunto na mistura asfáltica. Neste capítulo, especifica-se também o procedimento de dosagem adotado para seleção dos compósitos asfálticos e os requisitos preconizados para a realização dos ensaios mecânicos.

O Capítulo 4 apresenta e discute os resultados dos experimentos.

No Capítulo 5 são expressas as conclusões dos resultados e dos fatos observados durante a presente pesquisa experimental, bem como sugerem-se as recomendações para trabalhos futuros, apontando à continuação do presente estudo.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. PAVIMENTO

Na história do Brasil Império verifica-se o princípio da construção de pavimentos, onde LOBATO (2011) relata que em 1861, no Império de Dom Pedro II, decretou-se a construção da primeira estrada brasileira, a Estrada de Rodagem União e Indústria, ligando as cidades de Santo Antônio do Paraibuna — atual Juiz de Fora, em Minas Gerais, à Petrópolis — na região serrana do Rio de Janeiro. Segundo ALBUQUERQUE (2004), o projeto baseava-se na compressão pelo próprio tráfego do revestimento do tipo macadame — composto por pedras justapostas e com espessura de 25cm acima do terreno natural, denominação em homenagem ao engenheiro idealizador James L. MacAdam. Entretanto, as tecnologias de calçamento asfálticos somente foram introduzidas no Brasil no início do século XX pelo engenheiro Francisco Passos, naquela oportunidade prefeito da cidade do Rio de Janeiro.

No entanto, tão somente no governo de Juscelino Kubitschek de Oliveira (1956-1960) a infraestrutura rodoviária emergiu pela sua inserção no Plano de Metas governamental. Conforme ALMEIDA (2004), o item Transportes compreendia 29,6% dos recursos previstos, dentre eles a pavimentação e construção de rodovias, valor superior ao item Indústria que abrangia 20,4% dos investimentos, em especial ao setor automobilístico. Igualmente, BERNUCCI *et al.* (2008) destaca o governo de Juscelino Kubitschek como impulsionador do rodoviarismo pelo aumento da área pavimentada do Brasil.

Logo, BALBO (2007) designa a meta da pavimentação em propiciar um tráfego confortável e seguro, com estruturas e materiais capazes de suportar os esforços decorrentes da ação do tráfego combinados com as condições climáticas, buscando o uso de materiais locais para garantir bom desempenho em termos de custos operacionais e manutenção.

2.1.1. Revestimento Asfáltico

A camada superior da estrutura do pavimento sujeita as ações de tráfego e com a função de transmitir os esforços para as camadas inferiores é conhecida como camada de rolamento ou revestimento. Nos pavimentos flexíveis, essa é referida como asfáltica, quando constituída de uma mistura com material betuminoso e agregados, pré-envolvida ou pré-misturada a quente ou a frio. No Brasil, o pavimento do tipo flexível é comumente executado pela economia no custo da obra e rapidez na execução, segundo SENÇO (2008) constituem-se em estruturas deformáveis ao serem submetidas a esforços de compressão e tração na flexão.

Acerca dos materiais formadores dos revestimentos do tipo flexível, particularmente o Concreto Asfáltico (CA) se compõe de agregados — graúdos e miúdos, de material de enchimento, e de ligante betuminoso. No caso dos agregados, o INSTITUTO DO ASFALTO (2002) fundamenta-os como responsáveis pela capacidade de suportar cargas dos pavimentos e provenientes de todos os materiais minerais inertes, resistentes, sob a forma de partículas ou fragmentos graduados. Por sua vez, consoante BARDINI, KLINSKY & FERNANDES JÚNIOR (2010), o material de enchimento (fíler): a) preenche os vazios entre os agregados graúdos nas misturas, alterando as propriedades dos ligantes asfálticos, pois age como parte ativa do mástique (combinação de ligante asfáltico, fíler e ar); b) influencia a lubrificação das partículas graúdas; e c) afeta os vazios do agregado mineral, as características de compactação e o teor “ótimo” do ligante asfáltico. MONTANARI (2007) define o ligante como responsável por oferecer uma parcela de resistência à tração por sua presença atuar como aglutinante dos agregados, proporcionando uma parcela coesiva — diferencial das misturas betuminosas.

Concernente aos agregados, particularmente no Município de Manaus, CAVALCANTE *et al.* (2012) verificaram que o uso do seixo rolado como agregado graúdo

(misturas do tipo CA), ou a utilização de misturas betuminosa do tipo areia-asfalto usinada a quente (AAUQ), ausente de grãos, sobre base e sub-base com baixo suporte (predominância argilosa) propiciam a formação de trincas, fissuras e panelas.

Neste contexto, trabalhos do Grupo de Geotecnia da Universidade Federal do Amazonas e outros constantes na literatura apresentam estudos buscando alternativas, visando adequar o revestimento asfáltico às circunstâncias regionais — clima, carga e disponibilidade de material: a) pela modificação do ligante asfáltico com polímeros (GUIMARÃES, 2009; BERTOLDO *et al.*, 2010; CAVALCANTE *et al.*, 2010; CUNHA, 2010; CUNHA *et al.*, 2010; OLIVEIRA *et al.*, 2010; SILVA *et al.*, 2010; CAVALCANTE *et al.*, 2011^b; CAVALCANTE *et al.*, 2011^c; CUNHA *et al.*, 2011; FERREIRA *et al.*, 2011^a; SILVA *et al.*, 2011^b e SILVA *et al.*, 2011^c); b) pela substituição do material pétreo por matéria prima local, como os agregados sinterizados de argila calcinada (FROTA *et al.*, 2006^a; FROTA *et al.*, 2007^a; FROTA *et al.*, 2007^d; SILVA *et al.*, 2008^a; SILVA *et al.*, 2008^b; MELO *et al.*, 2008; NUNES *et al.*, 2009^a; NUNES *et al.*, 2009^b; CAVALCANTE *et al.*, 2010; FERREIRA *et al.*, 2011^a; CAVALCANTE *et al.*, 2011^a; CAVALCANTE *et al.*, 2011^b; CAVALCANTE *et al.*, 2011^c; SILVA *et al.*, 2011^a e SANTOS, 2007); e c) pelo emprego de materiais alternativos provenientes de resíduo de construção e demolição como agregados grãos e miúdos (FROTA *et al.*, 2003; FROTA *et al.*, 2006^b; FROTA *et al.*, 2007^b; FROTA *et al.*, 2007^c; FROTA *et al.*, 2007^e; MELO *et al.*, 2008; MELO, 2009; GUIMARÃES, 2009; FERREIRA *et al.*, 2011^a; FERREIRA *et al.*, 2011^b; e SILVA *et al.*, 2011^a).

Na literatura técnica-científica sobre os pavimentos asfálticos, merece destaque as análises de ligantes modificados por polímeros (LEITE, 1999 e ODA, 2000), e não menos importante sobre os agregados alternativos supracitados (BATISTA, 2004; CABRAL, 2005; NASCIMENTO, 2005; NUNES, 2006).

Acerca do uso de fibras naturais ou sintéticas como melhoradores de estruturas, têm-se registros do uso de fibras de Sisal e Malva em argamassas cimentícias (VENTURA *et al.*, 2006; MARTINS NETO, 2011; e PERES, 2011). Notadamente, ressaltam-se no Brasil os estudos da sua incorporação ao solo (MACHADO *et al.*, 1998), e da aplicação na mistura do tipo concreto asfáltico (HOMEM, 2002), na Areia-Asfalto (BENTO, 2006), ou como elemento do mástique asfáltico em misturas do tipo SMA (VALE, 2007 e OLIVEIRA FILHO, 2007).

2.2. STONE MATRIX ASPHALT

O revestimento asfáltico do tipo “*Stone Matrix Asphalt - SMA*” (Matriz Pétreo Asfáltica) foi desenvolvido na Alemanha, objetivando sanar os problemas das estradas germânicas, quanto às deteriorações consequentes da presença de neve nos rigorosos invernos dessa região. Para tal problemática, inicialmente, foi proposto o uso de pneus com pinos, que por sua vez produziram um alto grau de deterioração após cada inverno, sendo necessário realizar ajustes nas faixas de rolagem com o ligante asfáltico e a colocação de uma camada subsequente de agregados. No entanto, como essa solução tornou-se dispendiosa, em meados dos anos 60 desenvolveu-se uma mistura de aglutinante betuminoso e esqueleto sólido chamada de “Mastimac”, o protótipo da atual SMA (VILLAMOR, 2011).

O emprego da mistura SMA mostrou o escorrimento do ligante betuminoso frente ao alto teor de vazios e pequeno percentual de finos. Visando solucionar tal problema, foi proposta a adição de fibras à argamassa desse compósito, que, também, de acordo com LANCHAS (1999, apud OLIVEIRA FILHO, 2007), faz com que a citada mistura possa submeter-se a temperaturas extremas sem perder eficiência ou sofrer degradação. Da mesma forma, VALE (2007) acrescenta que tais fibras permitem que o ligante fique mais

consistente a altas temperaturas, diminuindo a formação dos afundamentos de trilhas de roda, visto que o cimento asfáltico é empregado em porcentagens elevadas, variando de 6,5% a 8,0% em peso.

Consoante SILVA (2005), o compósito SMA é um tipo de revestimento asfáltico a quente, produzido para maximizar o contato grão/grão e a resistência à ação do tráfego, caracterizado por conter uma quantidade elevada de agregados graúdos, em torno de 70% a 80% maiores que 4,75mm, nas faixas cujo agregado nominal é superior a 8mm. Formando-se, portanto, um maior volume de vazios entre os agregados graúdos, logo preenchidos pela argamassa composta das frações areia e fíler, do ligante asfáltico e das fibras.

Em complemento, SOUZA (2007) considera que o elevado intertravamento entre os grãos proporciona ganho na resistência, visto que a proporção de agregados graúdos é superior à proporção dos mesmos nas misturas densas e contínuas, enquanto o elevado teor de mástique fornece a mistura maior durabilidade pelo filme de ligante mais espesso recobrando os agregados, por sua vez aumentando a resistência do revestimento à fadiga, ao desgaste e ao envelhecimento.

A *Nacional Asphalt Pavement Association* (NAPA), formada por membros com um grande número produções/contratos (projetos nos Estados Unidos, Alemanha, etc.) e possuidora de grande acervo relativo aos equipamentos para mistura quentes, reuniu em uma publicação os conceitos e diretrizes para o projeto e construção de misturas SMA.

Por meio de tais experiências, a NAPA (2002) destaca inúmeras vantagens técnicas e econômicas do SMA comparativamente as misturas densas convencionais, além das características físicas habitualmente notórias como ilustrado na Figura 2. São estas: a) melhor desempenho — maior vida útil e resistência á água, provavelmente devido ao teor de asfalto ser relativamente elevado; b) redução do nível de ruído — vários estudos tem indicado um decrescimento significativo no nível de ruído; c) melhor resistência ao atrito — com textura superficial semelhante à de graduação aberta que oferece alta resistência ao

atrito, portanto maior segurança em condições de pista molhada, menor respingo e *spray*; d) visibilidade — a textura áspera drena mais água em vez de acumular sobre a superfície. Isso resulta em redução de brilho à noite, menor reflexão das luzes de veículos e aumento da visibilidade das marcações no pavimento.

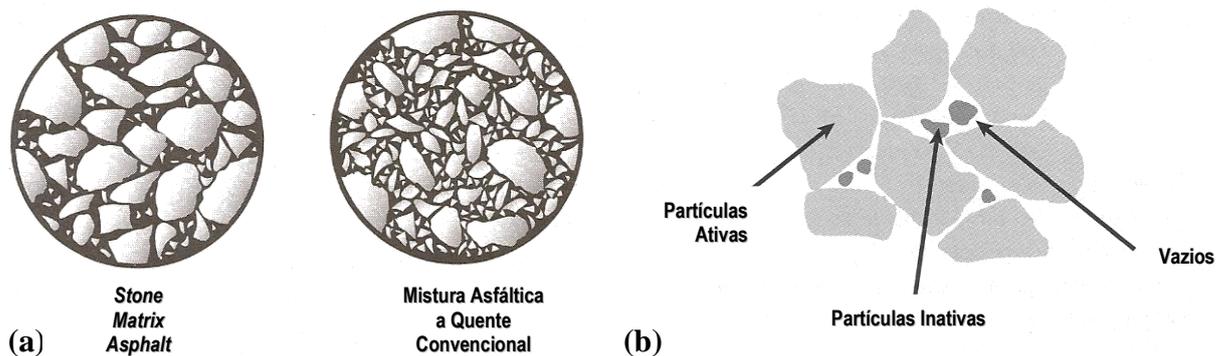


FIGURA 2 - Stone Matrix Asphalt: (a) Comparação com a Mistura Densa Convencional e (b) Esquema do Esqueleto Pétreo
FONTE - NAPA (2002)

O custo da mistura SMA é relatado pela NAPA (2002) como sendo de 20-25% mais elevado respeitante ao da mistura densa tradicional, factivelmente ocasionado pela presença das fibras ou polímeros modificadores. Relativo ao ciclo de vida, na Geórgia observou-se um tempo igual a 7,5 anos para mistura densa e 10 anos para a mistura descontínua. Esta comparação correspondeu a um aumento de 30-40% na vida do pavimento com SMA, como geralmente executado na Europa. Logo, a citada publicação potencializa o uso do SMA em pavimentos para transporte de tráfego pesado e/ou submetido a altas pressões de pneus.

Em 1991 o revestimento tipo SMA foi introduzido nos Estados Unidos, contabilizando hoje sua presença em mais de 28 estados em vias de alto volume de tráfego. Pela sua ampla utilização reconhecem-se as suas propriedades de resistência, maior durabilidade, melhor fricção, redução do nível de ruído e qualidade do rolamento, benefícios comparados à mistura densa (CA).

Atinente à influência da temperatura na mistura SMA, SUCHISMITA (2009) observou que a Resistência à Tração diminui com o aumento da temperatura, no intervalo de 5 a 40°C, e que em uma temperatura particular os compósitos com cimento asfáltico de petróleo 60/70 têm maior Resistência à Tração atinente às misturas com ligante asfáltico 80/100. Quanto à mistura com fibra, esta apresentou elevada Resistência à Tração e Módulo de Resiliência superior aos compósitos sem a participação desse material. Além disto, verificou-se neste trabalho que o Módulo de Resiliência depende do tipo do ligante, das fibras e da temperatura de ensaio.

BROWN *et al.* (1997) inspecionaram e avaliaram mais de 100 misturas de SMA em pavimentos construídos nos Estados Unidos, indicativo ao tempo de serviço (cinco anos ou menos), e submetidas a um tráfego pesado. Os resultados mostraram excelente resistência à Fadiga da maioria dos pavimentos construídos com SMA, bem como maior resistência a fissuras, respeitante às misturas densas, provavelmente devido ao elevado teor de asfalto e maior espessura das camadas. Tais resultados enfatizam que as misturas SMA compensam seu maior custo de implantação pelo excelente desempenho, notadamente em pistas com elevado volume de tráfego.

Igualmente, ASI (2006) inferiu que embora as misturas de graduação densa apresentem elevada resistência à compressão e tração, os compósitos do tipo SMA mostram maior durabilidade e propriedades de resiliência, provando sua superioridade de desempenho em campo. Logo, conclui o autor, especialmente em climas quentes, as propriedades de resiliência, durabilidade e resistência à fadiga proporcionam a essas misturas vantagens referentes aos compósitos de graduação densa, além de melhor resistência a danos causados pela água, fato atribuído à maior espessura de película de asfalto em torno do agregado.

Relativo ao filme betuminoso, NEVES FILHO, BERNUCCI & FERNANDES JUNIOR *et al.* (2004) indicaram que as misturas SMA com asfalto-polímero ou asfalto-

borracha têm uma película asfáltica mais espessa da ordem de 50% maior do que uma mistura com granulometria contínua, sendo uma vantagem quanto a inibição ao desgaste. Por outro lado, polímeros podem ser utilizados na mistura asfáltica também para melhorar a viscosidade do ligante e com isso, reduzir o efeito do escorrimento, contudo não mais eficazes que as fibras como averiguado em MOKHTARI & NEJAD (2012), o qual ressalva a opção pelas fibras, devido ao custo, disponibilidade e facilidade de aplicação (ODA, FERNANDES JÚNIOR & ILDEFONSO, 2012 e CHIU & LU 2007).

Deve ser igualmente lembrado que o alto custo dos polímeros incentiva a utilização de resíduos industriais, objetivando minimizar custos, exemplo: a) resíduos de garrafas plásticas como polímeros, caso do Polietileno Terifalato (PET). AHMADINIA *et. al* (2011 e 2012) aferiram as propriedades volumétricas Marshall, o qual apresentaram resultados aceitáveis, e concluíram o beneficiamento do compósito pela cristalização do material polimérico e pelo aumento da área de superfície que segura o aglutinante, devido a incorporação das fibras PET; e b) inserção de resíduos de tapetes automotivos, que de acordo com o abordado por PUTMAN & AMIRKHANDIAN (2004), previnem o escorrimento, aumentam a resistência da mistura e o desempenho quanto à deformação permanente, confrontada às misturas SMA com fibras habitualmente utilizados na indústria.

Segundo PROWELL *et al.* (2009), pelas características mecânicas satisfatórias até o ano de 2009, Estados Unidos, Canadá, África do Sul, China, Nova Zelândia, Austrália e 14 países da Europa empregaram compósitos SMA em suas estradas. Os relatos dos países europeus indicam o citado revestimento como experiência muito positiva, notadamente quanto às características da superfície, durabilidade e conforto de rolamento.

Particularmente no Brasil, encontram-se especialmente registros de sua aplicação no estado de São Paulo — pista de autódromo de Interlagos e em trechos de rodovias (destaque para a via Anchieta e a Rodovia Presidente Dutra) e no estado do Ceará — trecho da rodovia BR 116 - Fortaleza/Pacajus (VALE, 2007; TAVARES, 2011; SOUZA, 2007 e

SILVA, 2005). Em vias urbanas, têm-se a construção de trechos experimentais em Salvador (ODA, EDEL & FERNANDES JÚNIOR, 2006), que embora tenham enfrentado o desconhecimento técnico dos órgãos responsáveis pela infraestrutura viária, os resultados demonstraram a atratividade deste tipo de mistura.

2.3. FIBRAS

As fibras podem ser orgânicas ou inorgânicas, dividindo-se em naturais e artificiais. As fibras vegetais fazem parte do conjunto das fibras naturais, abrangendo também as fibras de origem animal e mineral. No entanto, MEIRELLES FILHO (2006) denominou por fibra orgânica natural aquela proveniente de vegetais que não se submeteu a processo industrial antes de seu emprego como reforço.

Tais fibras de origem vegetal são encontradas na biodiversidade ambiental, contando com inúmeras espécies passíveis de serem analisadas quanto a sua viabilidade química e física, objetivando seu uso na indústria como, por exemplo, em compósitos poliméricos. Por se tratar de um material sustentável, cultivável e em alguns casos, proveniente de resíduos agrícolas, tais materiais tornaram-se alvo de pesquisas para aplicação na engenharia de materiais, além da preocupação ambiental, sendo atualmente empregadas na indústria automobilística.

Segundo MEIRELLES FILHO (2006), as fibras da Amazônia já são conhecidas há milênios pelos indígenas, presentes na sua vida doméstica, e podem adquirir importância como fonte de renda para região, ao posicionar a Amazônia com maior destaque no mercado de fibras naturais.

As fibras vegetais podem ser provenientes do caule, da folha, da semente ou do fruto e são compostas basicamente de celulose, hemicelulose, pectina e minerais, destacando-se a lignina como fator de escolha devido às características de resistência e

estabilidade térmica. PASSOS (2005) cita que a lignina une as fibras celulósicas, formando a parede celular e fornecendo resistência à compressão, cuja concentração influencia a estrutura, as propriedades, a morfologia, a flexibilidade e a taxa de hidrólise, portanto fibras com alto teor de lignina têm maior preferência para algumas aplicações.

Na literatura, pouco se encontra sobre pesquisas com o uso de fibras vegetais inseridas em compósitos poliméricos, sendo mais utilizadas as fibras sintéticas, minerais e metálicas. Particularmente, com aplicabilidade em compósitos para a Engenharia Civil, destacam-se as fibras de sisal e coco, indicadas na Figura 3, que variam, principalmente, quanto à origem (caule, folha, semente ou fruto), ao comprimento (curtas ou longas), a composição química e ao comportamento físico:

- Fibra de Sisal: proveniente da folha, portanto seu tamanho depende da disposição longitudinal da fibra na folha; e segundo BERALDO & VIEIRA (2003) se compõem quimicamente de celulose (65,8%), hemicelulose (12,0%), pectina (0,8%), lignina (9,9%), substâncias solúveis em água (1,2%), substâncias graxas e ceras (0,3%). Nesse trabalho os autores avaliaram sua incorporação em argamassa de areia e cimento, mostrando-se inibidoras da pega do cimento quando utilizadas na dosagem de 10,80%, tendo a resistência à compressão do compósito reduzido acentuadamente. Em compósitos asfálticos tipo SMA, ODA, FERNANDES JÚNIOR & ILDEFONSO (2012) aferiram melhor percentual de escorrimento do ligante para as misturas com fibras de sisal comparativamente as fibras de coco, entretanto proporcionaram menores resultados mecânicos.
- Fibra de coco: consiste nas fibras extraídas por maceração ou processos mecânicos da casca (mesocarpo) do coco. Sendo a água deste fruto um dos alimentos mais consumidos no Brasil, principalmente no verão, o que resulta em grande volume de cascas descartadas passíveis de serem utilizadas em pesquisas. NOGUEIRA *et al.*

(1998, apud CARRIJO, LIZ & MAKISHIMA, 2002) destacam a grande percentagem de lignina (35-45%) e de celulose (23-43%), e a pequena quantidade de hemicelulose (3-12%) nesses materiais. As publicações científicas empregando a fibra de coco objetivam seu uso em compósitos asfálticos do tipo SMA. VALE, SOARES & CASAGRANDE (2007) confeccionaram tal mistura com um percentual de fibras entre 0,5% e 0,7%, apresentando como resultados boa eficiência pertinente ao escorrimento, mas com dificuldades na sua trabalhabilidade durante a confecção dos corpos-de-prova como consequência do seu tamanho, não obstante obtiveram satisfatória Resistência à Tração. Em complemento, ODA, FERNANDES JÚNIOR & ILDEFONSO (2012) indicaram o melhor Resistência a Tração e Módulo de Resiliência das misturas SMA com fibras de coco relativos aos compósitos com fibra de sisal ou fibras de poliéster.



FIGURA 3 - Fibras Vegetais: (a) Sisal e (b) Coco

FONTE - (a) ODA, FERNANDES JÚNIOR & ILDEFONSO (2012) e (b) VALE (2007)

2.3.1. Fibras de Curauá

Segundo RAMALHO (2005), o curauá (*Ananas Erectifolius* L .B. Smith) é uma planta característica da Amazônia paraense, que cresce também em solo arenoso e pouco fértil, chegando a atingir entre 1 a 1,5m de altura, conforme Figura 4.a. LEDO (1967, apud SILVA, 2012), distingue duas ocorrências de tipos de curauá: um de folhas roxo-avermelhadas, que se mais se desenvolve, chamado de curauá roxo; e outro de folhas verde-claras, conhecido por curauá branco. Adicionalmente, BELÉM (2002, apud CORDEIRO & SILVA, 2008) aborda que a fibra do curauá é reciclável e biodegradável, o que a credencia como uma das fibras mais promissora entre as produzidas na Amazônia brasileira.

Consoante CORDEIRO & SILVA (2008), seu cultivo teve início no Lago Grande de Curuai, no Município de Santarém (PA), se expandindo para outras regiões do Estado, sendo a primeira colheita realizada um ano após o plantio, e repetindo-se a cada três a quatro meses. Os pequenos produtores que ocupam estas áreas fabricam materiais ecológicos com a mencionada fibra, como cordas, sacos e utensílios domésticos, extraída de suas folhas geralmente por decorticação — retirada das fibras usando rolos ou discos estirados girando em sentidos contrários com velocidades diferentes ou despeliculamento por atrito ou por impacto, como apresentado na Figura 4.b.

Sobre a demanda, TOMCZAK, SATYANARAYANA & SYDENSTRICKER (2007) consideram que cada planta produz cerca 50 a 60 folhas por ano, podendo em 1 hectare cultivar-se 10.000 plantas. Logo, produzindo cerca de 60.000Kg de folhas por ano, correspondendo a 3.600Kg de fibra natural por hectare (Figura 4.c e 4.d). Tal montante incentiva a produção, mormente para a economia regional, seja para uso em utensílios domésticos, ou como material para compósitos automobilísticos, devido à sua resistência, maciez e peso reduzido (ROCHA & GHELIER JÚNIOR, 2003, apud PEREIRA *et al.*, 2007).



FIGURA 4 - (a) Plantação de Curauá Branco e Roxo, (b) Extração da Fibra da Folha do Curauá, (c) Fibras do Curauá processadas e (d) Secagem das Fibras do Curauá
FONTE - (a) e (d) SILVA (2012), (b) John (2012^b) e (c) John (2012^a)

SPINACÉ *et al.* (2009) indicam uma resistência a tração igual a $900 \pm 200 \text{MPa}$ e Módulo de Young de $36 \pm 10 \text{GPa}$ para as fibras de curauá, sendo tais valores maiores relativos às fibras, como o bambu, palma, coco ou sisal. Observando-se, ainda, que tais valores podem apresentar pequena redução ao passarem por tratamentos. Concernente à degradação térmica, notou-se uma perda de peso inicial, a 75°C , atribuída à perda de água na forma de umidade absorvida, passando posteriormente por três processos: o primeiro $236\text{-}297^\circ\text{C}$ atribuído à decomposição da hemicelulose, o segundo a $298\text{-}366^\circ\text{C}$ com a degradação da celulose, e por fim a 439°C correspondente a decomposição lenta da lignina, relacionada à desidratação.

De acordo com ERENO (2004) mesmo com uma espessura reduzida, a mencionada fibra tem capacidade de suportar tensões elevadas, e essa propriedade faz dela uma substituta natural da fibra de vidro, que ao ser misturada a outros materiais que têm como base o polipropileno, como, por exemplo, sobras de cobertores e carpetes descartados pela

indústria têxtil, transforma-se em um compósito utilizado pela indústria automobilística. Contudo, em geral, a citada fibra (Figura 5.a) possui partes descartadas no seu beneficiamento, que não apresentam qualidades de uniformidades e não são passíveis da separação, as quais formam tufo fibrosos (Figura 5.b).



FIGURA 5 - (a) Fibra do Curauá fornecida pelo Centro de Biotecnologia da Amazônia (CBA) e (b) Pontas da Fibra comumente descartadas pela Indústria

Quanto à composição química, CÔRREA *et al.* (2010) identificaram na fibra de curuá a presença de celulose, hemicelulose e lignina em teores iguais a $70,2\pm 0,7\%$, $18,3\pm 0,8\%$ e $9,3\pm 0,9\%$, respectivamente. Igualmente aferiram a decomposição térmica a 273°C com perda de massa ocorrida possivelmente pela despolimerização da celulose e hemicelulose.

Neste panorama, o estudo de fibras vegetais, para inclusão em compósitos, mostra-se como material alternativo sustentável para a indústria. Como afirma ARAUJO *et al.* (2010) as fibras comumente utilizadas, exemplo das sintéticas, apresentam sérias desvantagens, tais como o elevado consumo de energia para a sua produção e elevados custos, em comparação com outros materiais de enchimento, e desgastes nos equipamentos de processamento. Portanto, as fibras naturais são recursos renováveis e no caso específico da fibra do curauá indica importante característica, exemplo da resistência mecânica similar à fibra de vidro, embora represente 80% do custo desta, complementa os autores.

Outro fator importante é destacado em ZAH *et al.* (2007), consistindo da aplicação socioambiental de fibras do curauá em materiais automotivos, pois tradicionalmente utilizam-se compósitos com fibras de vidro, que são difíceis de reciclar. Em contraste, por queima, pode-se recuperar a energia dos compósitos de fibras naturais, além de possuírem menor peso. Com isso, os autores destacam as vantagens do uso da fibra do curauá, tais como: o custo similar às outras fibras naturais; a tensão e a resistência à flexão são mais elevadas relativas às fibras de coco, sisal ou juta, atingindo quase as propriedades físicas de fibras mais dispendiosas, como de linho e de vidro; apresentam um impacto ambiental significativamente menor, em torno de aproximadamente 30%; e podem agregar valor às regiões subdesenvolvidas e rurais que cultivam essa espécie.

2.4. AGREGADOS ALTERNATIVOS

O agregado graúdo partícipe da mistura asfáltica consiste em um material com partículas maiores que 2,00mm: a) de composição natural, proveniente de rochas, ou artificial; e b) obtido por processo industrial ou reciclado, por meio do reuso de outros materiais. No entanto, diversas características devem ser observadas visando a sua aplicação em misturas asfálticas.

ZHANG *et al.* (2009) descreveram a textura do material pétreo como uma das características mais importante no estudo da aderência deste agregado ao asfalto e do efeito anti-deslizante do pavimento. Similarmente HU, SHI & ZHANG (2011) inferem aos diâmetros dos poros do agregado a influência para a absorção do asfalto, bem como sua composição mineral – por exemplo, maior teor de quartzo, proporcionando menor adesão com o asfalto. Para SHAH & ABDULLAH (2010), as formas do agregado graúdo influenciam nas propriedades da mistura compactada — a forma angular demonstrou a

melhor resistência à derrapagem, seguida pelo agregado alongado e por último o formato lamelar.

Conforme SENÇO (2008) podem se apresentar para fins de serviço de pavimentação, materiais resultantes de rochas fragmentadas em britadores, seixos rolados encontrados nos leitos atuais e antigos dos rios, de jazidas resultantes de alteração de rochas, de escória de alto-forno. Tais materiais graúdos representam o maior volume em relação aos demais componentes de uma mistura betuminosa.

Quanto aos agregados processados pelo método de britagem de rochas, consoante SARGES (2010), no Estado do Amazonas esta matéria-prima ocorre longe dos centros populacionais, tornando-se dispendiosa sua exploração. Além disso, o arcabouço rochoso do Estado é formado principalmente pelas chamadas rochas moles ou sedimentares das bacias do Solimões e Amazonas que, em geral, são menos adequadas para este fim. Devido ao intenso intemperismo físico-químico a que foram submetidas tais rochas, propiciou-se o desenvolvimento de espessa camada de solos, recobertas por densa cobertura vegetal da floresta, contribuindo ainda mais para a escassez de material pétreo. Em vista disso, o Grupo de Geotecnia da UFAM — onde se realizaram os experimentos do trabalho em pauta, tem buscado alternativas por meio da utilização de matéria prima disponível na região ou resíduos da indústria da construção civil, conforme trabalhos já mencionados.

O crescimento do mercado brasileiro da construção civil em 12,1%, registrado por uma expansão das incorporações, obras e serviços nos anos de 2008 a 2009 (CBIC, 2009), acarretou paralelamente um volume de resíduos sólidos que urge pelo destino apropriado face às questões ambientais. Neste mesmo período, teve-se um aumento de 13,81% da coleta de resíduos sólidos no Brasil segundo ABRELPE (2009), indicando uma possível proporcionalidade entre a expansão desta indústria e o descarte de materiais.

Desta maneira, faz-se necessário o uso de tecnologias para triagem desse material visando seu reaproveitamento no próprio mercado da construção civil, como os agregados

de resíduo de construção e demolição (Figura 6), evitando, assim, seu descarte. Contudo, não se tem encontrado registros na literatura nacional e internacional do emprego dos agregados de resíduo de construção e demolição em compósitos asfálticos do tipo *Stone Matrix Asphalt* — objeto deste trabalho. Na forma de agregados provenientes de resíduos, dispõe-se de publicações com emprego, por exemplo, de resíduos de pedras basálticas combinados com 0,4% de fibras e 5% de polímero (KARAKUS, 2011).



FIGURA 6 - Agregados de Resíduo de Construção e Demolição nas frações correspondentes à (a) Brita 1 e (b) Brita 0

2.5. ANÁLISE MECÂNICA

2.5.1. Mistura Asfáltica

A mistura asfáltica é normalmente composta por uma parcela betuminosa e outra constituída pelos agregados, com isso a análise do comportamento mecânico de tal compósito é inferida pela interação destas parcelas e suas propriedades quanto ao desempenho nas condições de tráfego, clima e temperatura.

O ligante asfáltico, partícipe desse compósito, possui propriedades visco-elasto-plásticas, conferindo, de acordo com THEISEN (2006), comportamento elástico e

viscoelástico. Tais propriedades diferenciam-se pelas relações de tensões e deformações, e respectivos modelos constitutivos empregados. O referido autor exemplifica que para abordagem elástica e viscoelástica utilizam-se os ensaios de Módulo de Resiliência e de Fluência ou *Creep Test*, respectivamente.

PINTO & PREUSSLER (1980, apud MOURÃO, 2003) explanam que o Módulo de Resiliência obtido por meio de carregamentos de curta duração e sob tensões baixas, representa comportamento aproximadamente elástico, não necessariamente linear, ou seja, o Módulo de Elasticidade.

Em suplemento, BARSKDALE *et al.* (1997, apud GIGANTE, 2007) inferem que o efeito das passagens dos veículos no pavimento simulam-se por cargas repetidas. Tal trabalho assinala que o tráfego induz no pavimento pulsos de tensões, de magnitudes variadas, com aplicações repetidas a cada elemento subjacente do pavimento, bem como até uma dada distancia ao lado das trilhas de roda. Particularmente próximo à superfície este pulso de tensão tem forma senoidal, que ao longo da profundidade tende a uma conformação triangular. Deste modo, o ensaio de Módulo de Resiliência (MR) é executado com o desenvolvimento de cargas cíclicas semelhantemente as distribuições das citadas tensões em campo.

Entretanto, a medição dos resultados de MR está sujeita a uma variação que depende do período de condicionamento da amostra, podendo ser menor quando a carga utilizada no experimento corresponda a um baixo percentual do valor de resistência do compósito (BRITO & GRAEFF, 2008). Neste contexto, averiguar um compósito asfáltico por meio dos ensaios de Resistência à Tração e Módulo de Resiliência corresponde, segundo REIS, BERNUCCI & ZANON (2001), ao que as misturas asfálticas devem possuir: (a) resistência à tração adequada para evitar rupturas precoces; e (b) flexibilidade suficiente para suportar as solicitações do tráfego.

3. METODOLOGIA

A mistura asfáltica do tipo *Stone Matrix Asphalt* é composta, em geral, de ligante asfáltico, agregados (graúdo e miúdo), fíler e fibras. Nesta dissertação foram utilizados os seguintes materiais: (i) cimento asfáltico de petróleo (CAP), fornecido pela Refinaria Isaac Sabbá, localizada em Manaus; (ii) agregado graúdo convencional (brita) e alternativo (RCD); (iii) areia residual como material miúdo; (iv) cimento *Portland* como fíler; e (v) fibra do curauá para evitar o escorrimento do ligante betuminoso.

A Figura 7 ilustra o fluxograma da metodologia utilizada para o projeto da mistura asfáltica SMA, cujo detalhamento é abordado no presente capítulo — os materiais, os métodos para caracterização e dosagem, bem como, os experimentos para análise do desempenho mecânico.

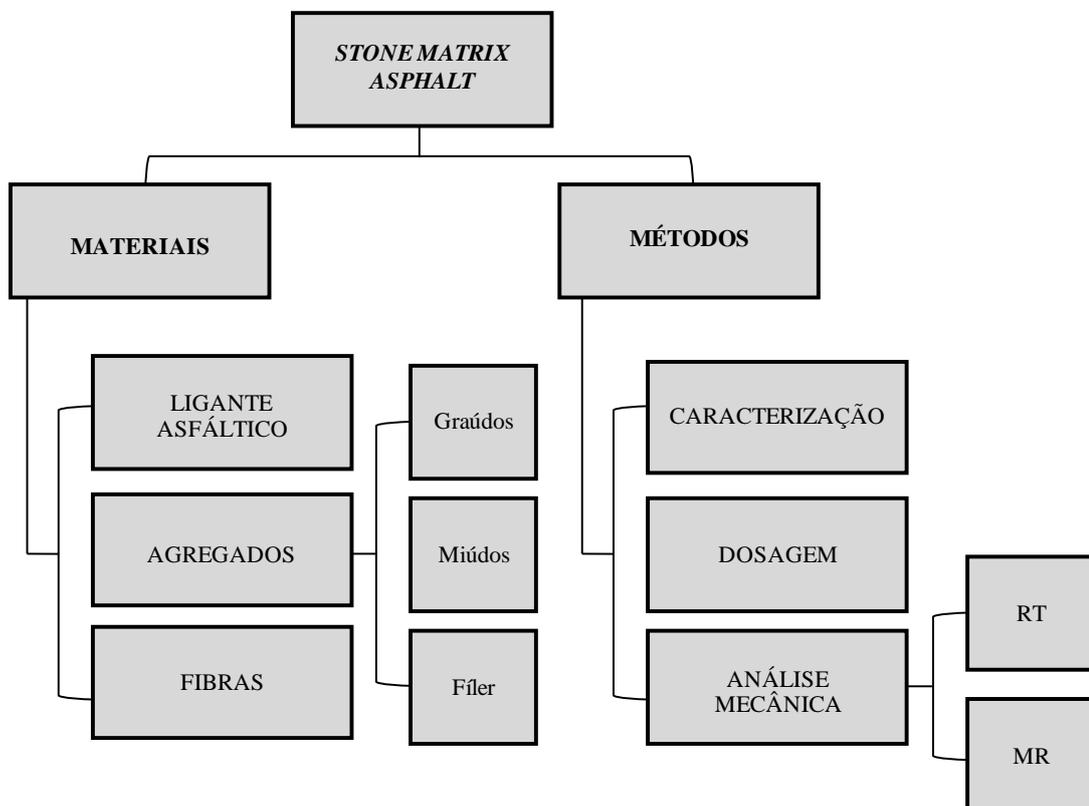


FIGURA 7 - Fluxograma da Metodologia

3.1. MATERIAIS

3.1.1. Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP)

O ligante betuminoso utilizado classifica-se como Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP 50/70), sendo oriundo de petróleos do Campo Fazenda Alegre, no Estado do Espírito Santo, e do Ceará-mar, no Estado do Ceará. Tal material foi provido pela Refinaria Isaac Sabbá (REMAN) a pesquisa em tela. Esta localizada no Município de Manaus e pertencente à empresa Petróleo Brasileiro S.A (Petrobrás).

Na Tabela 1 expõem-se os dados, segundo especificação da Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP), para os ensaios de caracterização tradicional do asfalto, visando seu emprego como ligante betuminoso. Realizaram-se na citada Refinaria os seguintes ensaios: Penetração, Ponto de Amolecimento, Viscosidade, Índice de Suscetibilidade, Ponto de Fulgor, Solubilidade de Tricloroetileno, Ductilidade e Efeito do Calor e do Ar, seguido da Variação em Massa, Ductilidade, Ponto de Amolecimento e Penetração.

TABELA 1 - Caracterização do Cimento Asfáltico de Petróleo

Características	Und	Limites				Métodos	
		CAP 30 45	CAP 50 70	CAP 85 100	CAP 150 200	ABNT	ASTM
Penetração (100 g, 5s, 25°C)	0,1mm	30 45	50 70	85 100	150 200	NBR 6576	D 5
Ponto de amolecimento, mín	°C	52	46	43	37	NBR 6560	D 36
Viscosidade SayboltFurol							
a 135 °C, mín	s	192	141	110	80	NBR 14950	E 102
a 150 °C, mín	s	90	50	43	36	NBR 14950	E 102
a 177 °C	s	40 150	30 150	15 60	15 60	NBR 14950	E 102
Viscosidade Brookfield							
a 135°C, mín	cP	374	274	214	155	NBR 15184	D 4402
a 150 °C, mín.	cP	203	112	97	81	NBR 15184	D 4402
a 177 °C, mín	cP	76 285	57 285	28 114	28 114	NBR 15184	D 4402
Índice de susceptibilidade térmica		(1,5) a (+0,7)	(1,5) a (+0,7)	(1,5) a (+0,7)	(1,5) a (+0,7)		
Ponto de fulgor mín	°C	235	235	235	235	NBR 11341	D 92
Solubilidade em tricloroetileno, mín	% massa	99,5	99,5	99,5	99,5	NBR 14855	D 2042
Ductilidade a 25° C, mín	cm	60	60	100	100	NBR 6293	D 113
Efeito do calor e do ar (RTFOT) a 163 °C, 85 min							
Variação em massa, máx	% massa	0,5	0,5	0,5	0,5	D 2872	
Ductilidade a 25° C, mín	cm	10	20	50	50	NBR 6293	D 113
Aumento do ponto de amolecimento, máx	°C	8	8	8	8	NBR 6560	D 36
Penetração retida, mín	%	60	55	55	50	NBR 6576	D 5

FONTE - ANP (2005)

3.1.2. Agregados

A mistura asfáltica pode ser composta de três tipos de agregados classificados quanto ao tamanho por: a) gráúdo, material com dimensões maiores que 2,0mm (Figura 8-a); b) miúdo, material com dimensões menores que 2,0mm e maiores que 0,075mm (Figura 8-b); e c) material de enchimento ou fíler, material com pelo menos 65% das partículas menores que 0,075mm (Figura 8-c).

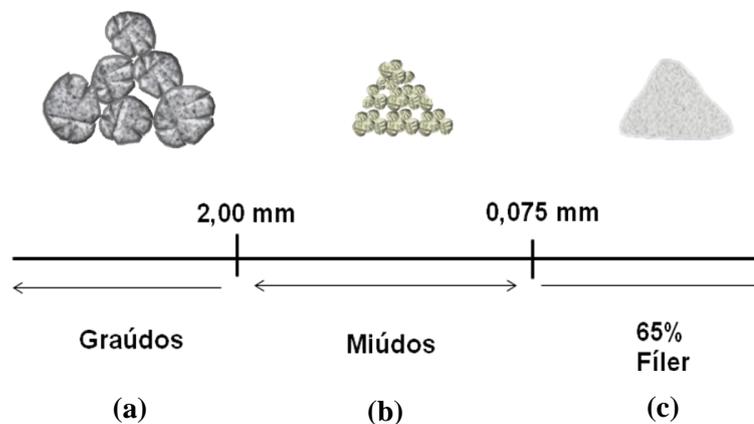


FIGURA 8 - Classificação dos Agregados

No trabalho em pauta empregou-se como: a) agregado gráúdo tradicional, a brita granítica comercializada no Município de Manaus; b) agregado gráúdo alternativo, os resíduos de construção e demolição britados e fornecidos pela Empresa Concrecicle Comércio de Materiais Reciclados para Construção Ltda, sendo remanescente de resíduos de concreto armado descartados pela indústria da construção civil no supracitado município; c) agregado da fração miúda, areia residual coletada nas proximidades do citado Município, na área circunscrita pelas coordenadas P₁ 03°08'45,40"S e 60°54'22,87"W, P₂ 03°08'47,70"S e 60°54'20,58"W, P₃ 03°08'56,91"S e 60°54'29,74"W, e P₄ 03°08'58,61"S e 60°54'32,03"W; e d) Para o material de enchimento elegeu-se o cimento *Portland CP II-Z-32*.

Analisaram-se inicialmente os mencionados materiais quanto à textura por meio dos resultados do ensaio de peneiramento (ASTM C136, 2006). Estes dados são importantes para o enquadramento dos componentes da mistura asfáltica na granulometria do revestimento do tipo SMA, pois objetiva uma maior composição de partículas graúdas a fim de proporcionar o contato grão-a-grão.

Os agregados graúdos também foram submetidos ao ensaio de absorção, densidade real (G_{sa}), densidade aparente (G_{sb}) e densidade aparente na condição superfície saturada ($G_{sb_{ssd}}$), com base na norma ASTM C127 (2012). Particularmente, a absorção aponta o aumento da massa do agregado devido ao preenchimento dos poros permeáveis com água (saturação), com isto ressalta-se a importância deste parâmetro na avaliação do potencial consumo de ligante betuminoso pelo agregado. Os parâmetros de absorção e densidade são determinados pelas relações entre as massas secas (A), superfície saturada seca (B) e submersa (C), apontadas nas equações 1 a 4.

$$Absorção = \frac{B - A}{A} 100 (\%) \quad (1)$$

$$G_{sa} = \frac{A}{A - C} \quad (2)$$

$$G_{sb} = \frac{A}{B - C} \quad (3)$$

$$G_{sb_{ssd}} = \frac{B}{B - C} \quad (4)$$

Por outro lado, determinaram-se as massas específicas do agregado miúdo e fíler por meio dos métodos do Picnômetro (DNER-ME 084/95) e frasco *Le Chantelier* (DNER-ME 085/94), respectivamente. O primeiro método consiste em determinar as massas resultantes da combinação agregado, água e picnômetro, considerando o descarte dos vazios de ar, por

sua vez expulsos pelo aquecimento do conjunto. Assim, a densidade é calculada pela expressão 5.

$$D_{real} = \frac{M_{pic+am} - M_{pic}}{M_{pic+ag} - M_{pic} - M_{pic+am+ag} - M_{pic+am}} \quad (5)$$

D_{real} – Densidade Real

M_{pic} – Massa Picnômetro

M_{pic+Ag} – Massa Picnômetro com Água

M_{pic+am} – Massa Picnômetro com Agregado Miúdo

$M_{pic+am+ag}$ – Massa Picnômetro com Agregado Miúdo e Água

Relativo à massa específica real do fíler (ME_{real}), acrescenta-se ao frasco *Le Chantelier* um líquido não-solvente do fíler, até coincidir com uma marca entre 0 e 1 na escala do frasco. Por conseguinte, adiciona-se a amostra ($M_{fíler}$) no frasco para no final anotar-se a o volume deslocado do solvente ($V_{deslocado}$) e calcular a ME_{real} por meio da equação 6.

$$ME_{real} = \frac{M_{fíler}}{V_{deslocado}} \quad (6)$$

No caso do ensaio de abrasão *Los Angeles* para o material graúdo, preconizado por DNER-ME 035/98, expressa em porcentagem o desgaste do agregado graúdo (A_n) quando exposto a uma carga abrasiva. Para isso, seleciona-se uma amostra correlacionada com a sua granulometria perante tabelas indicadas em norma e a quantidade de esferas de aço (Figura 9) — que auxiliará a simulação do desgaste por meio de um tambor rotativo. A citada alteração é aferido com auxílio dos dados da equação 7.

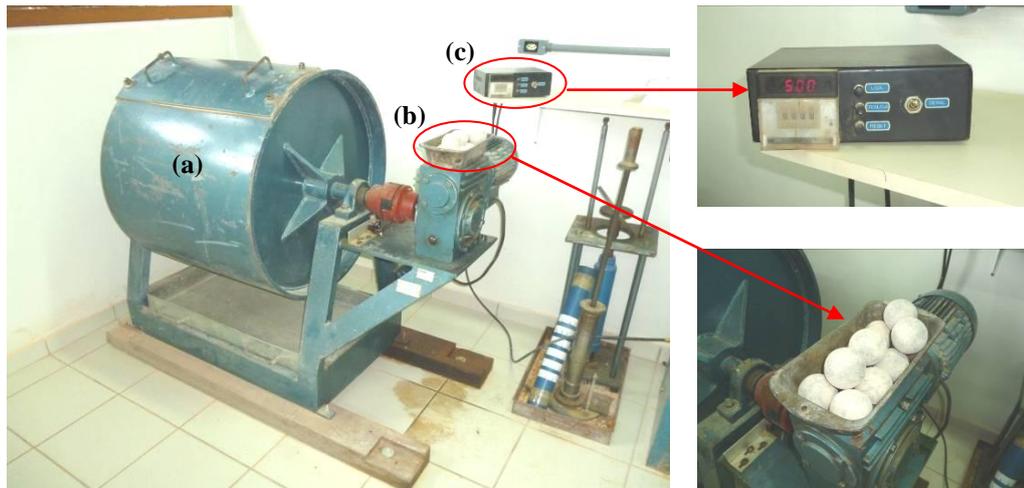


FIGURA 9 - Equipamento Abrasão Los Angeles: (a) Tambor Rotativo, (b) Esferas Metálicas e (c) Contador de Rotações

$$A_n = \frac{m_n - m'_n}{m_n} \times 100 \quad (7)$$

A_n – Abrasão *Los Angeles* da Graduação n (%);

m_n – Massa total da amostra seca;

m'_n – Massa da amostra lavada e seca, após o desgaste (retida na peneira 1,7mm).

Tais materiais pétreos graúdos também foram caracterizados quanto às suas Massas Específicas Solta e Compactada, consoante AASHTO T19 (2009), e calculadas pela equação 8.

$$\gamma_{\text{agregado}} = \frac{G - T}{V} \quad (8)$$

γ_{agregado} – massa específica agregado graúdo;

G – massa do agregado mais o recipiente;

T – massa do recipiente;

V – volume do recipiente.

Adicionalmente foram verificadas a adesividade (DNER-ME 079/94) e o índice de forma (ABNT NBR 7809, versão corrigida 2008). A adesividade representa a satisfatoriedade quanto ao potencial do material pétreo aderir à película de ligante, o qual depende das propriedades da superfície do agregado, bem como da composição química do ligante. O índice de forma classifica o agregado quanto à forma: cúbica, lamelar, alongada ou alongada-lamelar.

3.1.3. Fibra do Curauá

Foram estudados os compósitos asfálticos com as fibras do curauá. Estas foram fornecidas à pesquisa pelo Centro de Biotecnologia da Amazônia – CBA. Em geral, as fibras vegetais podem ser armazenadas para a posterior comercialização, favorecendo, principalmente, as comunidades mais distantes de centros consumidores de produtos agrícolas (FRAXE, PEREIRA & WITKOSKI, 2007). No caso da Região Amazônica, esta é detentora de variadas espécies, tais como: malva, curauá, sisal, cipó, piaçava, tucumã, etc.

Submeteram-se tais fibras à caracterização física para diferenciá-las e analisá-las à luz do comportamento mecânico, quando participe das misturas asfálticas, e em particular quanto ao comprimento e massa específica. O comprimento médio das fibras pode ser determinado por medição, empregando um paquímetro, ou pela utilização de equipamentos, como o microscópio eletrônico de varredura.

Contudo, no caso das fibras supracitadas, estas foram cortadas manualmente em 0,02m de comprimento (Figura 10), visto que em testes realizados para este trabalho esta dimensão mostrou melhor desempenho relativo ao tamanho de 0,006m. Também vale ressaltar que a fibra do curauá não foi empregada em tamanhos superiores ao escolhido, devido a possível formação de emaranhados de fibras dificultando sua dispersão no material. De acordo com ABTAHI, SHEIKHZADEH & HEJAZI (2010) fibras longas

podem acumular-se, não se misturando com o asfalto. Em contrapartida, fibras muito curtas podem não proporcionar efeito de reforço, servindo como um material de enchimento na mistura.



FIGURA 10 - Fibra do Curauá: frações cortadas para uso na mistura asfáltica

Em relação à densidade real, esta foi determinada por meio da norma DNER-ME 084/95 para agregados miúdos (Figura 11). Não obstante, também foram realizados testes sem êxito por meio do frasco *Chapman* (DNER-ME 194/98) e do *Le Chatelier* (ABNT NBR 11582:1991), pois durante o período de equilíbrio térmico do conjunto — frasco e amostra, o acúmulo de bolhas de ar prejudicou as leituras dos ensaios, conforme as Figuras 12 e 13, ocasionando o descarte das metodologias dos frascos *Chapman* e *Le Chatelier*.

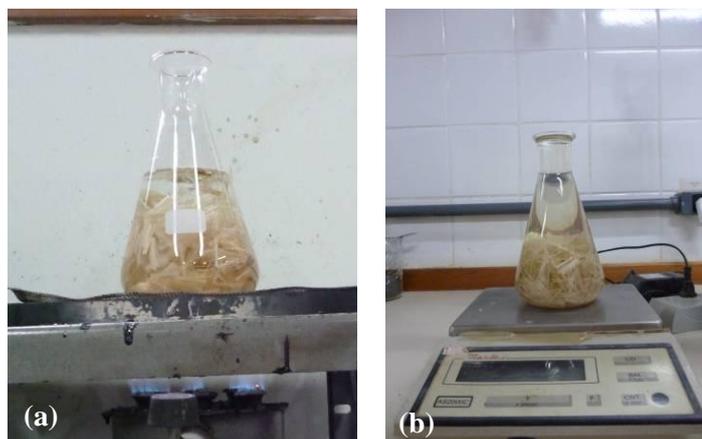


FIGURA 11 - Determinação da Massa Específica da Fibra: (a) aquecimento para expansão de ar e (b) pesagem do conjunto picnomêtro e amostra

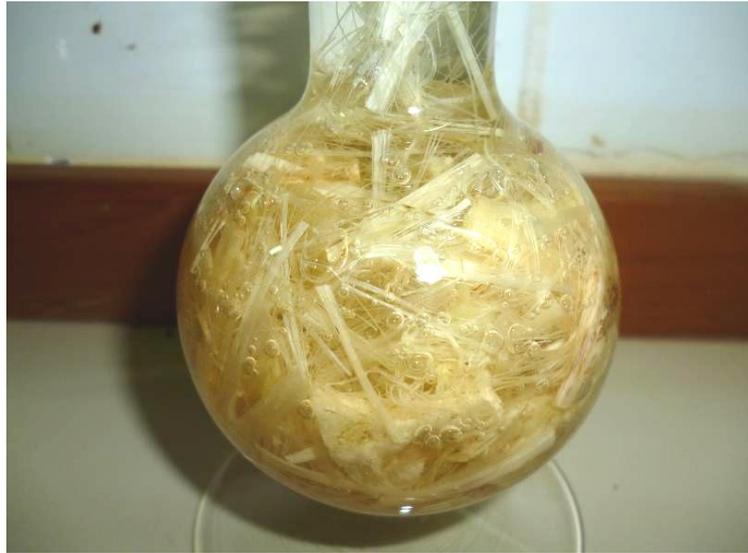


FIGURA 12 - Ar presente no ensaio de massa específica pelo Frasco Chapman

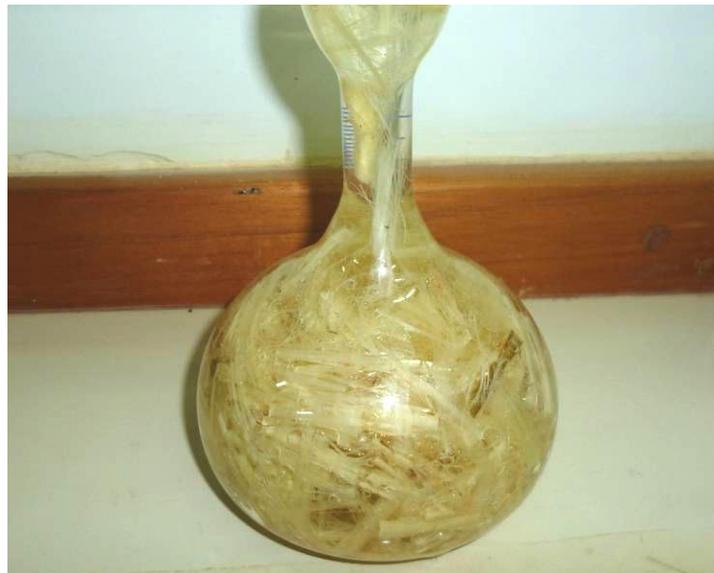


FIGURA 13 - Ar presente no ensaio de massa específica pelo Frasco Le Chantelier

3.2. MISTURA ASFÁLTICA SMA

Para execução do SMA, a composição de agregados seguiu as faixas granulométricas máximas e mínimas descritas na Tabela 2. REIS (2002, apud VALE, 2007) indica em seu trabalho a dosagem mineral de 70 a 80% de agregados graúdos, 20 a 30% de agregado fino e 8% a 13% de fíler. Para a presente dissertação considerou-se a granulometria da mistura com tamanho máximo nominal de 19,0mm, segundo limites estabelecidos em NAPA (2002).

TABELA 2 - Faixas Granulométricas para misturas do tipo SMA

Peneir a (mm)	TMN = 25,0mm		TMN = 19,0mm		TMN = 12,5mm		TMN = 9,5mm	
	Inferior	Superior	Inferior	Superior	Inferior	Superior	Inferior	Superior
37,5	100	100	-	-	-	-	-	-
25,0	90	100	100	100	-	-	-	-
19,0	30	86	90	100	100	100	-	-
12,5	26	63	50	74	90	100	100	100
9,5	24	52	25	60	26	78	90	100
4,75	20	28	20	28	20	28	26	60
2,36	16	24	16	24	16	24	20	28
1,18	13	21	13	21	13	21	13	21
0,60	12	18	12	18	12	18	12	18
0,30	12	15	12	15	12	15	12	15
0,075	8	10	8	10	8	10	8	10

TMN – Tamanho Máximo Nominal

FONTE - NAPA (2002)

Concernente ao maior percentual de fíler comparativamente às misturas densas, DAVIDSON & KENNEPOHL (1992, apud ASI, 2006) afirmam que esta grande quantidade desempenha um papel importante nas propriedades de mistura SMA, particularmente em termos de volume de vazios, vazios de agregado mineral e teor “ótimo” de asfalto.

No tocante ao ligante asfáltico, as normas referentes à mistura do tipo SMA indicam um intervalo de 6,0 a 7,0%. Atinente às fibras, a literatura (REIS, 2002 apud VALE, 2007) aponta as porcentagens em peso total do compósito de 0,3% a 1% para um escorrimento de até 0,3% do cimento asfáltico de petróleo. VALE (2007) expõe que na Europa e na América do Norte as fibras de celulose ou minerais correspondem em peso do total da mistura igual a 0,3% e 0,3% a 0,4%, respectivamente.

Quanto à execução da mistura, segundo ABTAHI, SHEIKHZADEH & HEJAZI (2010), em geral, o processo seco é o preferido nas pesquisas em relação a outros, por ser o mais fácil de executar, permitindo uma melhor distribuição de fibras e minimizando a aglomeração na mistura. Respeitante ao processo úmido, este não possui vantagens aparentes uma vez que as fibras não derretem no contato com o asfalto, além da complexidade em introduzir tal material de forma homogênea na mistura. Dessa forma, prepararam-se as misturas pelo processo seco, como ilustrado na Figura 14.

Vale lembrar que se executou a simulação do envelhecimento de curto prazo da mistura asfáltica, atribuído ao processo de usinagem. Foi realizado laboratorialmente submetendo o compósito não compactado à estufa, na temperatura aproximada de 162,5°C, por um período de 2 horas antes do procedimento de confecção dos corpos de prova.



FIGURA 14 - Esquema da execução da mistura asfáltica SMA com a fibra do Curauá: mistura mineral (a) com Brita e (b) com RCD, (c) inserção das fibras, (d) mistura dos agregados e fibras, (e) pesagem do ligante asfáltico e (f) aspecto da mistura asfáltica.

3.3. DOSAGEM DA MISTURA ASFÁLTICA

3.3.1. Dosagem com Compactador Marshall

No Brasil a dosagem de misturas asfálticas preconizada pelo Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) baseia-se na norma DNER-ME 43/95 - Misturas Betuminosas a Quente – Ensaio Marshall. Esta norma estabelece a tripla repetição de cada dosagem (enquadramento mineral + teor de CAP), na qual são aferidos os parâmetros volumétricos e de estabilidade e fluência do compósito.

No tocante ao enquadramento mineral, segundo uma dosagem tradicional, este consiste no encaixe granulométrico dentro dos limites máximos e mínimos estabelecidos, por exemplo, pelo DNIT perante o tipo de revestimento asfáltico — areia-asfalto, concreto asfáltico, etc. No caso da mistura proposta, tipo SMA, a dosagem mineral foi elaborada pelos preceitos da NAPA (2002) indicado na Figura 15, posto que não se tenha referência em normas brasileiras.

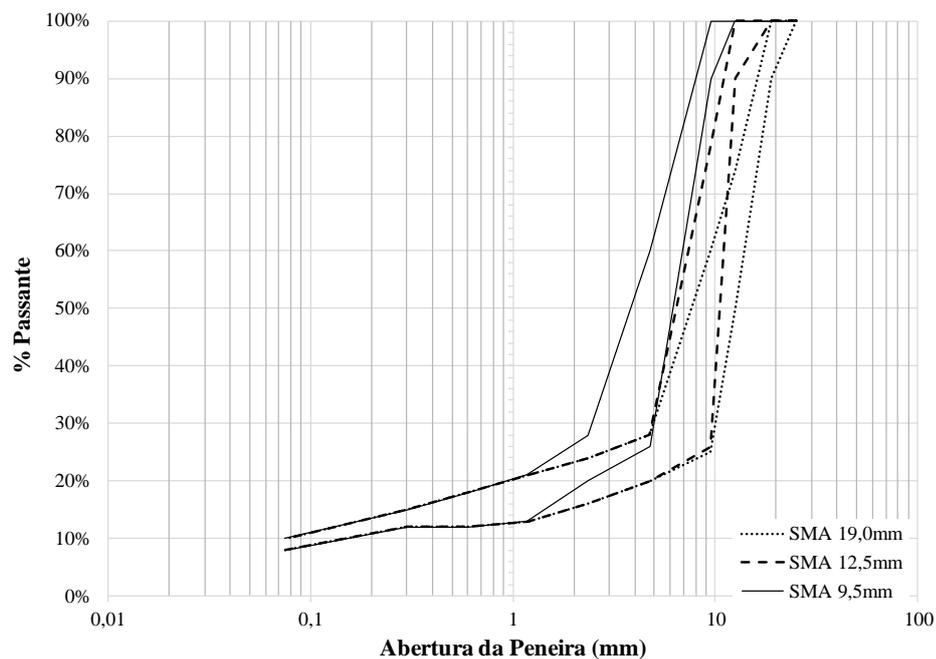


FIGURA 15 - Limites Máximos e Mínimos Granulométricos para Mistura do tipo SMA
FONTE - NAPA (2002)

Realizada a dosagem mineral, prossegue-se de acordo com a Figura 16, pela adição de teores de CAP variando, em geral, em 0,5% alternados, para mais e para menos, dentro dos valores apontados pela norma ou literatura acerca do tipo de revestimento asfáltico, para na sequência aferir o volume das amostras.

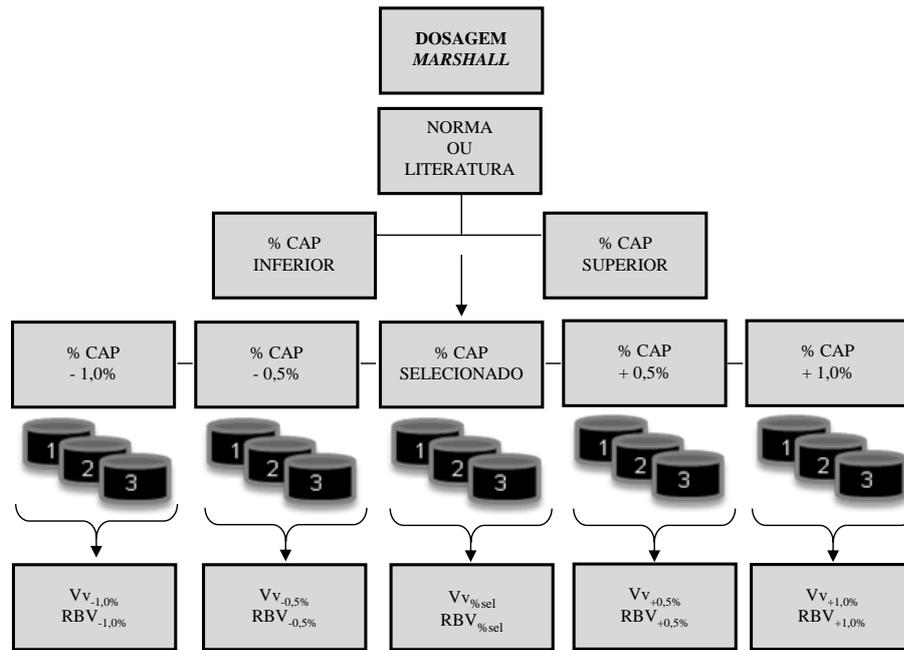


FIGURA 16 - Fluxograma Dosagem Marshall

Tomando-se como modelo os preceitos da norma DNER-ME 043/95 (Misturas Betuminosas a Quente – ensaio Marshall), acerca das temperaturas empregadas na dosagem Marshall, utiliza-se o ligante betuminoso a uma viscosidade de 170 ± 20 centistokes ou 85 ± 10 segundos *Saybolt-Furol*. Com isso, os agregados devem ser aquecidos de 10 a 15°C acima do material asfáltico. Para a compactação, a mistura deve possuir temperatura correspondente à viscosidade do ligante em torno de 280 ± 30 centistokes ou 140 ± 15 segundos *Saybolt-Furol*.

Após esse procedimento, a supracitada norma preconiza calcular a massa necessária de mistura asfáltica para produzir corpos de prova Marshall, provendo em amostras cilíndricas com 101,6mm de diâmetro e $63,5 \pm 1,3$ mm de altura. Assim, aquecem-se os

materiais, em seguida misturando-os até completa cobertura dos agregados pelo ligante e inicia-se o procedimento de compactação no equipamento Marshall (Figura 17.a).

Em seguida, embora se recomenda a aplicação de 75 golpes por face do corpo de prova devido ao tráfego pesado, para mistura asfálticas do tipo SMA se infere o uso de 50 golpes (AASHTO M325-08, *Standard Specification for Stone Matrix Asphalt*). Conforme ASI (2006) setenta e cinco golpes tendem a quebrar mais o agregado, além de não resultar em um aumento significativo da densidade.

Após a compactação, repousam-se as amostras ainda nos moldes cilíndricos por, no mínimo, 12 horas à temperatura ambiente a fim de evitar fraturas ou deformações (Figura 17.b), e na sequência as amostras são extraídas dos moldes (Figura 17.c).



FIGURA 17 - (a) Compactador Marshall, (b) Mistura compactada no molde Marshall e (c) Corpos de Prova para Dosagem da Mistura Sem Fibra

Para se determinar o Volume de Vazios (V_v), Vazios Agregado Mineral (VAM), Relação Betume/Vazios (RBV) e Vazios Cheios de Betume (VCB), foi empregado as equações de 9 à 12. Para tais equações, encontraram-se as densidades do compósito na condição solta (Figura 18) e compactada (Figura 19), indicando, respectivamente, as densidades máxima medida (DMM ou Gmm) e densidades aparentes (G_{mb}).

$$V_v(\%) = \frac{DMM - G_{mb}}{DMM} \quad (9)$$

$$VCB(\%) = \frac{G_{mb} \times \%a}{D_a} \quad (10)$$

$\%a$ – teor de CAP da amostra;

D_a – densidade do CAP da amostra.

$$VAM(\%) = V_v + VCB \quad (11)$$

$$RBV(\%) = \frac{VCB}{VAM} \quad (12)$$



FIGURA 18 - Mistura Asfáltica SMA na Condição Solta para Ensaio de DMM



FIGURA 19 - Misturas Asfálticas SMA parafinadas na condição compactada para ensaio de Densidade Aparente

Em complemento, segundo NAPA (2002) foi criado o parâmetro VCA (*Voids in the Coarse Aggregate*) para garantir um esqueleto pétreo com contato visual entre os agregados graúdos. Logo, faz-se a medição do VCA da mistura compactada (designado VCAMIX), visando assegurar que este possui valor igual ou menor que o VCA do agregado graúdo (VCA_{DRC}). Tais índices são calculados por meio das equações 13 e 14.

$$VCA_{DRC} = \left(\frac{G_{ca}\gamma_w - \gamma_s}{G_{ca}\gamma_w} \right) \times 100 \quad (13)$$

$$VCA_{MIX} = 100\% - \left(\frac{G_{mb}}{G_{ca}} \times P_{ca} \right) \times 100 \quad (14)$$

VCA_{DRC} – vazios da fração graúda do agregado compactado, em %;

VCA_{MIX} – vazios da fração graúda do agregado na mistura compactada, em %;

G_{ca} – massa específica aparente da fração graúda do agregado, em kg/m³;

G_{mb} – massa específica aparente da mistura compactada, em g/cm³;

P_{CA} – fração graúda do agregado em relação ao peso total da mistura, em g/cm³;

γ_s – massa específica da fração graúda do agregado seco compactado, em kg/m³;

γ_w – massa específica da água, em kg/m³.

Para os dados das equações 13 e 14, utilizaram-se os valores adquiridos nos experimentos preconizados pelas normas ASTM C127 (2012) e ASTM C29 (2009) para os índices G_{ca} e γ_s , respectivamente. Atinente à fração graúda do agregado em relação ao peso total da mistura (P_{CA}), se iniciou com o tamanho máximo nominal do agregado graúdo, segundo o ensaio de granulometria, e em sequência, pela Tabela 3, verificou-se qual peneira que indica o valor de P_{CA} para este tamanho máximo nominal, resultando no valor igual à massa passante na peneira indicada.

TABELA 3 - Definição da Fração Graúda do Agregado em relação ao Peso Total da Mistura (P_{CA})

Diámetro Nominal do Agregado Graúdo		Porção de Agregado Retido (P_{CA})	
25mm	1"	4,75mm	Nº4
19mm	3/4"	4,75mm	Nº4
12,5mm	1/2"	4,75mm	Nº4
9,5mm	3/8"	2,36mm	Nº8
4,75mm	Nº4	1,18mm	Nº16

FONTE - NAPA (2002)

Por conseguinte, NAPA (2002) estabelece os limites descritos na Tabela 4 para misturas confeccionadas no compactador Marshall, onde o teor de projeto de ligante é escolhido para produzir 4% de Volume de Vazios, pois conforme a evolução dos pavimentos de SMA é sugerido que tal percentual irá estabelecer e proporcionar melhor resistência a sulcos, particularmente em climas quentes.

TABELA 4 - Especificações para Mistura SMA confeccionadas no compactador Marshall

Propriedade	Limite
Cimento Asfáltico de Petróleo	6% (mínimo)
VV	4%
VMA	17% (mínimo)
VCA_{MIX}	Menor que VCA_{DRC}
Escorrimento	0,30% (máximo)

FONTE - NAPA (2002)

Adicionalmente, também foram correlacionados os valores de Vv e RBV às respectivas dosagens de teor de CAP apontando os limites máximos e mínimos de Vv de 3% a 5% e RBV de 75% a 82%, a fim de analisar o comportamento físico da mistura asfáltica. Por conseguinte, anotaram-se os teores correspondentes aos citados limites e efetuado uma média para o Vv e RBV, onde a média dos teores médios relacionados ao Vv e RBV reporta-se ao teor de projeto de CAP para o encaixe granulométrico mineral elaborado.

3.3.2. Dosagem da Fibra

No tocante ao desempenho da fibra, verifica-se por meio de ensaio laboratorial se o teor de fibra considerado no projeto de mistura asfáltica é satisfatório para evitar o escorrimento do mástique em até 0,30%. A norma AASHTO T 305/97 (*Determination of Draindown Characteristics in Uncompacted Asphalt Mixtures*) preconiza a metodologia para aferir tal problema.

A citada norma mede o escorrimento de uma amostra não compactada colocada em um cesto normatizado pela AASHTO M92 - *Standard Specification for Wire-Cloth Sieves for Testing Purposes* (2005). Ressalta-se que como não foi encontrada uma malha de 6,3mm ou similar (como especificado) disponível para compra imediata, a referida cesta foi confeccionada artesanalmente conferindo-se o espaçamento da malha por meio de um paquímetro.

O conjunto cesto com amostra deve ser pesado e posteriormente posicionado sobre um prato para acondicionamento em estufa (Figura 20) na temperatura de produção da mistura por 60 ± 5 minutos. Porém, após este tempo caso a amostra tenha sua temperatura reduzida em mais de 25°C (77°F) este ensaio deve ser realizado em 70 ± 5 minutos. Em sequência, o conjunto é removido da estufa e determina-se sua massa, então calculando o escorrimento pela equação 15.



FIGURA 20 - Ensaio de Escorrimento após o Acondicionamento em Estufa

$$\text{Escorrimento (\%)} = \frac{A - B}{C} \times 100 \quad (15)$$

A – Peso final conjunto cesto e amostra;

B – Peso inicial conjunto cesto e amostra;

C – Peso da amostra inicial.

O valor do escorrimento de uma mistura asfáltica SMA corresponderá à média de dois ensaios. Sobressai-se neste procedimento também a realização em duas temperaturas: uma do ligante para mistura e outra adicionada em 15°C, com a finalidade de averiguar a variação da temperatura na usinagem. Logo, foi executado tal ensaio nas misturas SMA com o teor de ligante "ótimo" adicionadas de um volume de fibras em relação ao seu total — 0,00%, 0,30% e 0,50% de fibras do curauá.

Por fim, designando-se a quantidade de fibras que evita o escorrimento em até 0,30% destas misturas. Definido o volume de fibras realiza-se novamente a dosagem Marshall,

agora com a inclusão das fibras, para então determinar o respectivo teor de projeto de ligante, conforme ilustrado na Figura 21.

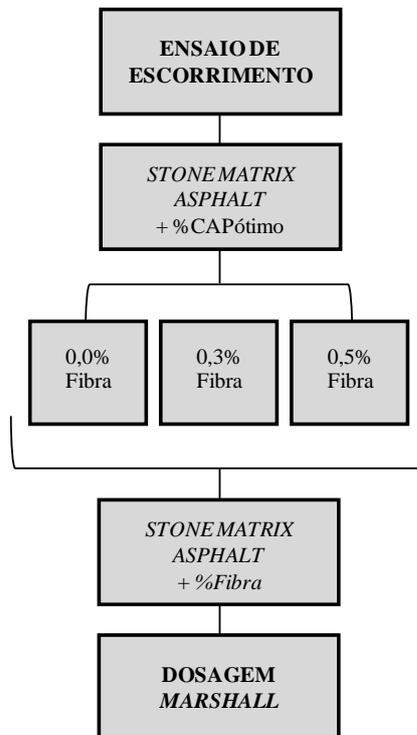


FIGURA 21 - Dosagem da Mistura SMA com Fibras

3.4. ENSAIOS MECÂNICOS

As misturas asfálticas SMA serão analisadas quanto ao desempenho mecânico por meio dos ensaios de Resistência à Tração e Módulo de Resiliência, a seguir abordados.

3.4.1. Resistência à Tração

Os pavimentos são sujeitos a esforços externos aplicados pelas rodas dos veículos, dos quais ocasionam pressões verticais que solicitam das camadas: flexão, cisalhamento, compressão vertical e horizontal. Particularmente a compressão vertical, esta causa o afastamento das partículas promovendo tração e compressão nas zonas de contato entre

agregados e ligantes. Quando as deformações de tração são repetidas, vão provocando deformações plásticas ou microfissuras nas citadas zonas podendo levar os materiais a um estado de fadiga ou ruptura. Tal ruptura pode ser medida em um ensaio de compressão diametral por meio do valor da força ou pressão que causa a ruptura, constituindo um arranjo que permite impor um plano de ruptura idêntico ao plano de aplicação de carga (BALBO, 2007).

Desta forma, GONÇALVES *et. al* (1998) conclui que o desempenho de um pavimento pode ser correlacionado às deformações de tração e de compressão que ocorrem em pontos críticos da estrutura devido à repetição das cargas do tráfego.

Tal resistência à tração (RT) dos compósitos asfálticos determina-se segundo os preceitos da norma DNIT 136/2010-ME, por meio de um método indireto onde as cargas são aplicadas no sentido diametral e na velocidade de 0,8 mm/s. Corpos de prova modelados nos teores de projeto serão submetidos ao ensaio até atingirem a ruptura, na pesquisa em pauta segundo as temperaturas de 25°C, 40°C e 60°C. Neste estudo foi executado tal ensaio no equipamento *Universal Testing Machine* (UTM 14), apresentado na Figura 22, acondicionada em uma câmara ambiental. A UTM 14 foi monitorada pelo software *UTS002 3.12 Stress Strain Test*, onde se determinaram os valores da RT pela equação 16.

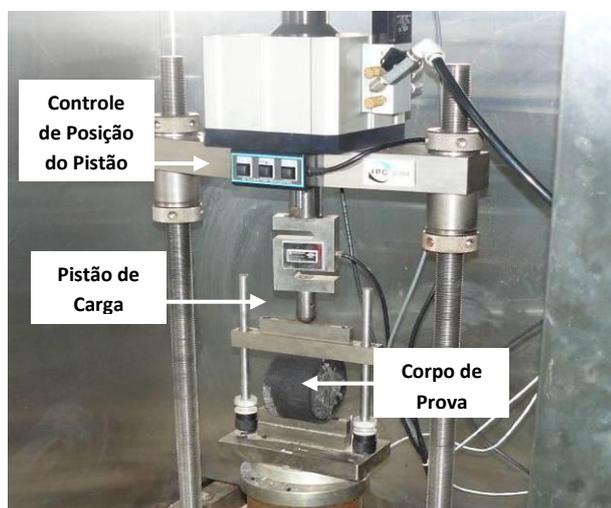


FIGURA 22 - Ensaio de Resistência à Tração no Equipamento UTM 14

$$\sigma_t = \frac{2P}{100\pi Dh} \quad (16)$$

Onde:

σ_t – Resistência à tração, em MPa

P – Carga de ruptura, em N

D – Diâmetro do corpo de prova, em cm

h – Altura do corpo de prova, em cm

3.4.2. Módulo de Resiliência

No tocante a análise das propriedades elásticas do material determinar-se-á o Módulo de Resiliência. Este parâmetro (MR) é análogo ao módulo de elasticidade, porém realizado sob cargas cíclicas e não estáticas, obtendo-se, então, uma maior representatividade da condição real de tráfego no pavimento (BRITO, 2006 e BRITO & GRAEFF, 2008).

Para a aferição do módulo de resiliência BRITO & GRAEFF (2008) descrevem os métodos nacionais e internacionais mais relevantes, diferenciando-os principalmente pelos aspectos de temperatura do ensaio, frequência, duração do pulso de carga, modo de contato dos leitores das deformações, número dos ciclos de carregamento, carga utilizada e coeficiente de Poisson, respectivamente apresentados na Tabela 5. Quanto à carga aplicada, será adotado o valor correspondente à condição preconizada em cada protocolo, conforme indicado na Tabela 5, por exemplo, em função do deslocamento ocasionado no corpo de prova (Δ) ou um percentual da RT alcançada pelo material em estudo.

TABELA 5 - Especificações dos Protocolos para ensaio de Módulo de Resiliência

Protocolos	°C	Frequência (Hz)	Tempo da Carga (s)	Leitores das Deformações	Ciclos	Carga	Poisson (ν)
AS 2891.13.1	25	NI	0,004	Suporte	NI	$\Delta = 0,005 \pm 2\text{mm}$	NI
ASTM D4123	5, 25, 40	0,33; 0,5; 1	0,1 a 0,4	Suporte ou colado	50 a 200	RT = 10% a 50%	NI
AASHTO TP-31-96	5, 25, 40	1	0,1	Suporte	≥ 30	RT = 5%, 15%, 30% (25°C)	0,10 a 0,50
LTPP P07	5, 25, 40	1	0,1	Colado nas faces	20-150	$\Delta = 0,038\text{mm}$	0,10 a 0,50
1-28-A DO NCHRP	25	1	0,1	Colado nas faces	NI	RT = 15% (25°C)	0,25 a 0,45
BSI DD 213	2, 10, 20	0,33	$0,124 \pm 0,004$	Suporte	NI	$\Delta = 0,005 \pm 2\text{mm}$	0,35
EN 12697 26/2004	2, 10, 20	NI	$0,124 \pm 0,004$	Suporte	NI	$\Delta = 0,005 \pm 2\text{mm}$	0,35
DNER 135/10	25	NI	NI	Suporte	NI	NI	0,30

FONTE - BRITO & GRAEFF (2008)

Para a presente dissertação selecionou-se os parâmetros delimitados pelos protocolos ASTM D4123 (1995) e AASHTO TP-31-96 (2000), conforme indicado no software *UTS003 1.41 Indirect Tensile Modulus Test* (Figura 23). Estes últimos são considerados de nível médio e alto de detalhamento, bem como, são habitualmente utilizados na comunidade científica.

Test method: ASTM D4123-02 / AASHTO TP31 (horiz. lvdts only, assumed Poisson's ratio)

Project: MR SMA BRITA_SEM FIBRA 25C 5% 2

Operator: Patricia Valença

Date and time: 2/10/2012 09:30:09

Template file: C:\Documents and Settings\Meu computador\Meus documentos\Patricia\SMA\MR SMA BRITA_SEM FIBRA 40C II 1.P003

Data file: C:\Documents and Settings\Meu computador\Meus documentos\Patricia\SMA\MR SMA BRITA_SEM FIBRA 25C 5% 2 035.D003

Specimen information

Dimensions	Point 1	Point 2	Point 3	Point 4	Point 5	Point 6	Average	Std Dev
Length (mm)	63.2	63.4	62.7	62.9			63.1	0.311
Diameter (mm)	101.6	101.4					101.5	0.141

Remarks: X-Section area (mm²): 8091.4

Tuning (actuator force)

Proportional: 5000, Increment: 1000

Integral: 12, Increment: 1

Derivative: 1200, Increment: 10

Loading shape: Select

Test control parameters

(b) Target temperature (°C): 25

(c) Loading pulse width (ms): 100

(d) Pulse repetition period (ms): 1000

(e) Conditioning pulse count: 100

(f) Peak loading force (N): 329

(g) Estimated Poisson's ratio: 0.35

Automatic level control:

Seating force: AASHTO TP31 (10% of peak)

Contact force (N):

FIGURA 23 - Software do Ensaio de Módulo de Resiliência: (a) Seleção do Protocolo, (b) Temperatura, (c) Tempo Pulso de Carga, (d) Tempo Ciclo de Carga e Descarregamento, (e) Número de Ciclos de Condicionamento, (f) Carga Aplicada e (g) Coeficiente de Poisson adotado.

Monitorada pelo supracitado software, a UTM 14 foi utilizada para o ensaio de MR, como também no ensaio de RT, mas com suportes para leitura dos deslocamentos horizontais por meio de um par de sensores do tipo *Linear Variable Differential Transducers* – LVDT, expostos na Figura 24.

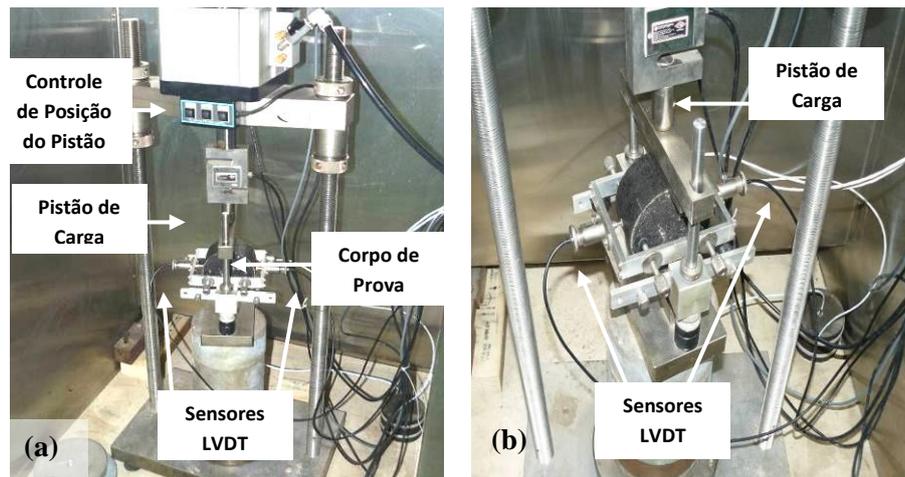


FIGURA 24 - Ensaio de Módulo de Resiliência: (a) Vista Geral e (b) Detalhe do Corpo de Prova no Ensaio

A respeito do valor do coeficiente de Poisson, admitiu-se para a temperatura de 25°C igual a 0,35 e para 40°C o valor de 0,35 e de 0,50. Para todas as condições, os corpos de prova foram condicionados a 100 ciclos, pois conforme a *Strategic Highway Research Program* (SHRP) adota-se de 50 a 100 pulsos para o ajuste da amostra (GIGANTE, 2007).

Quanto à carga aplicada, os corpos de prova foram submetidos ao carregamento de 5%, 15% e 30% da tensão de Resistência à Tração, dentro dos intervalos preconizados em ASTM D4123 (1995) e AASHTO TP-31-96 (2000). Salienta-se que nesta pesquisa nos MR's a 40°C, quando aplicado um percentual da carga de RT realizada a 25°C houve precoces deformações, que podem ser visualizadas na Figura 25, e/ou os LVDT's alcançaram seus limites de leitura de deformação (Figura 26), mormente as cargas de 30% da RT. Com isso, foram utilizadas as cargas de RT a 25°C e 40°C respectivamente nos MR's a 25°C e 40°C.

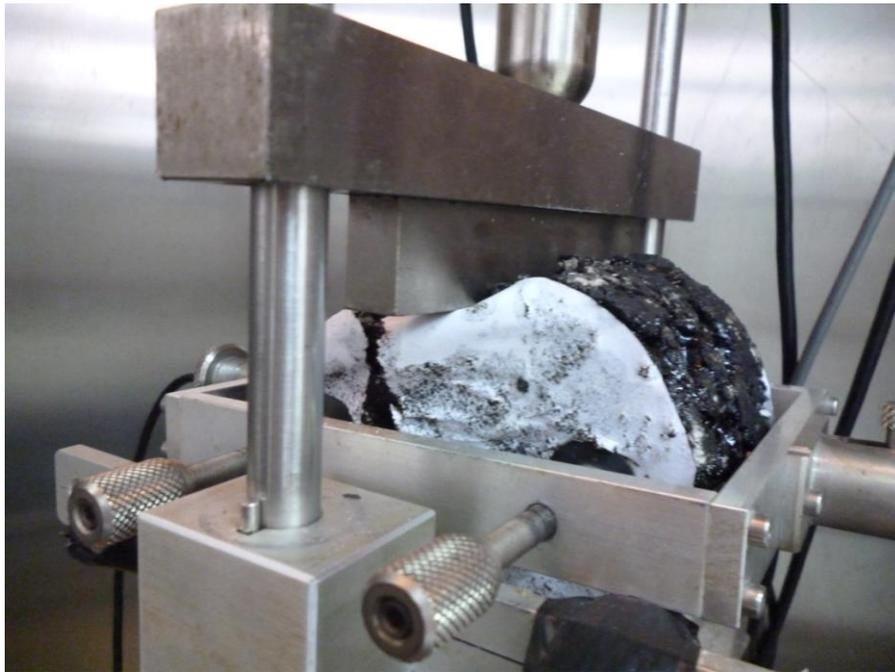


FIGURA 25 - Execução do MR a 40°C com 30% da RT obtida a 25°C

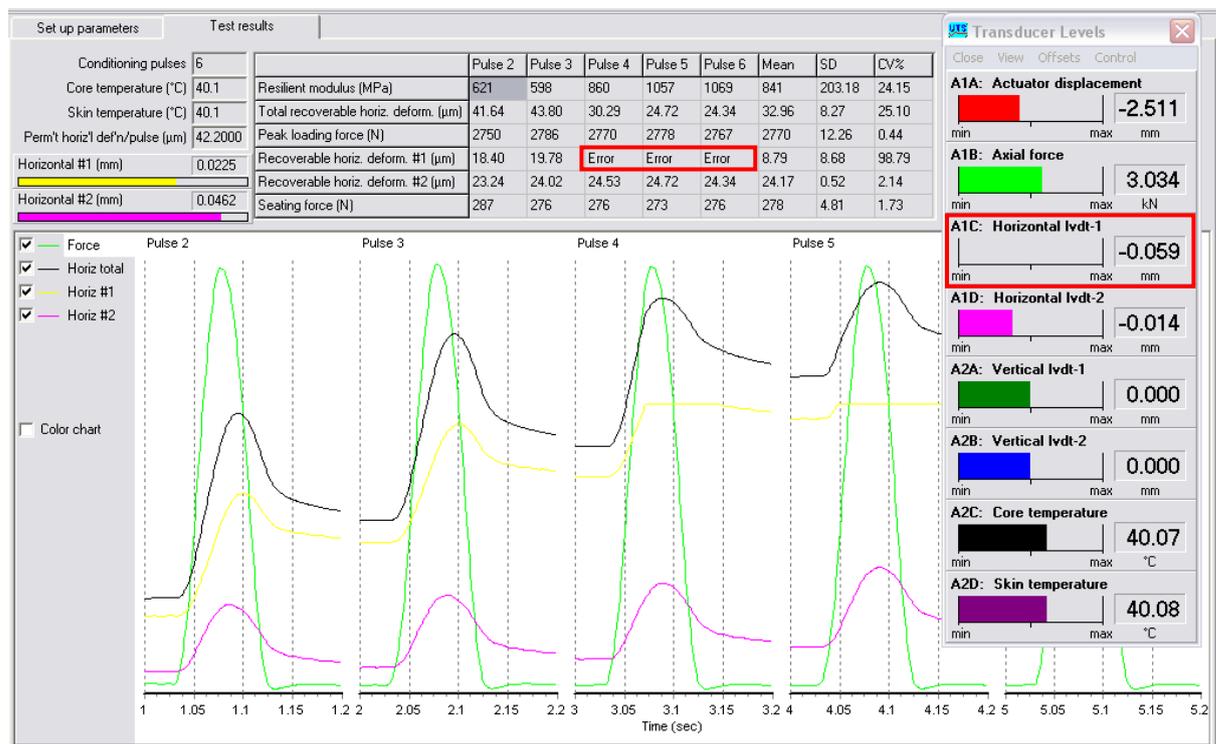


FIGURA 26 - Execução do MR a 40°C com 30% da RT obtida a 25°C

Tal fato se deve ao percentual da carga de ruptura a 25°C, exemplo de 30%, aliado ao ciclo de condicionamento de 100 estágios acarretarem a situar o corpo de prova em uma zona de falha, como instrui BRITO & GRAEFF (2008) para um alto percentual da

resistência a tração, a zona de estabilidade passa a ser muito curta e a zona de falha passa a ser mais facilmente atingida.

Relativo aos resultados, pela Figura 27 observa-se que o software informa numérica e graficamente as deformações horizontais lidas, onde o MR final é ponderado como a média de cinco pulsos de carregamento e descarregamento após os ciclos de condicionamento. Contudo, para esta dissertação o resultado admitido para cada tipo de mistura asfáltica e temperatura ensaiada foi calculado pela média de três amostras de resultados aproximados em até 15%.

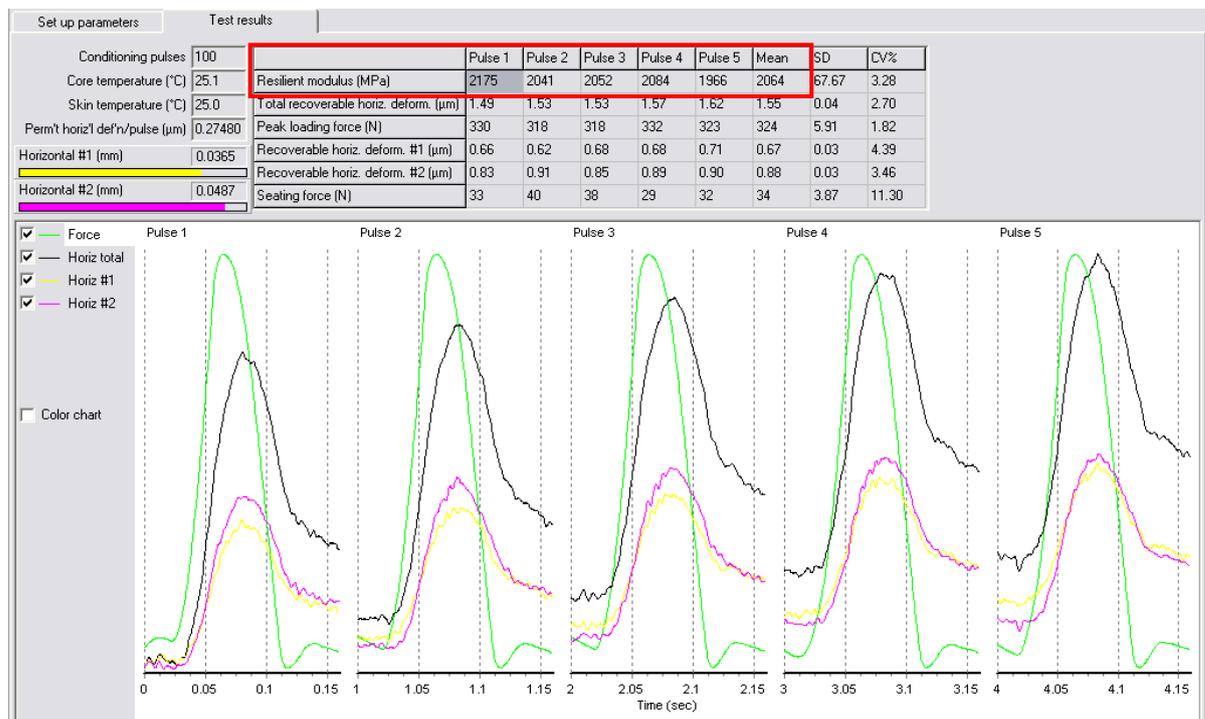


FIGURA 27 - Aspecto do Resultado Final do Ensaio de Módulo de Resiliência

Acerca do cálculo do MR, o software utilizado calcula os resultados por meio da equação 17, atendendo as normas inicialmente selecionadas. Tal equação é proveniente do modelo de Hondros (BRITO & GRAEFF, 2008), cuja vantagem perante supracitados autores é a consideração de carga distribuída por um friso, e não apenas uma carga pontual.

$$MR = \frac{P}{\Delta h} (\nu + 0,2699) \quad (17)$$

Onde:

MR – Módulo de resiliência, em MPa

P – % da força axial da resistência à tração, em N

Δ – Deslocamento medido, em mm

h – Média da altura do corpo de prova, em mm

ν – Coeficiente de Poisson

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste Capítulo apresentam-se os resultados dos experimentos descritos na metodologia deste trabalho, bem como a análise dos dados, comparativamente ao disposto na revisão bibliográfica. Ressalta-se que concernente ao tipo de mistura asfáltica do tipo SMA, não foram encontrados publicações a respeito do uso do agregado de Resíduo de Construção e Demolição (RCD), como material graúdo e da aplicação da fibra do curauá.

4.1. CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

4.1.1. Ligante Asfáltico

O ligante asfáltico foi caracterizado pela REMAN, em Manaus, por meio dos ensaios tradicionalmente utilizados e parametrizados pela Agencia Nacional de Petróleo (ANP). Os resultados dos ensaios, indicados na Tabela 6 e 7, o classificaram como Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP) 50/70, pois a Penetração a 25°C consistiu em 69 décimos de milímetros.

TABELA 6 - Caracterização do Ligante Asfáltico

Características	Método	Unid	ANP (2005) CAP 50/70	CAP 50/70
Penetração	D5	0,1 mm	50-70	69
Ponto de amolecimento	D36	°C	46	49,7
Ponto de fulgor	D92	°C	235	318
Solubilidade em tricloroetileno	D2042	% massa	99,5	99,9
Ductilidade	D113	cm	60	> 100
Densidade relativa a 20/4C	D70	N/A	-	0,998

TABELA 7 - Viscosidades e Parâmetros (após Envelhecimento) do Ligante Asfáltico

Características	Método	Unid	ANP (2005) CAP 50/70	CAP 50/70
Viscosidade Saybolt Furol a 135°C	E 102	s	141	283
Viscosidade Brookfield a 135°C	D4402	cp	274	539
Viscosidade Saybolt Furol a 150°C	E 102	s	50	140,7
Viscosidade Brookfield a 150°C	D4402	cp	112	279,8
Viscosidade Saybolt Furol a 177°C	E 102	s	30-150	50,8
Viscosidade Brookfield a 177°C	D4402	cp	57-285	96,8
RTFOT variação em % massa	D2872	%	0,5	0,04
RTFOT aumento do ponto de amolecimento	D36	°C	8	7,1
RTFOT penetração retida	D5	%	55	63

Quanto às características de Ponto de Amolecimento e Solubilidade em Tricloroetileno, estas se mantiveram próximo dos valores indicados pela ANP. Diferentemente, o Ponto de Fulgor apresentou valor superior. No entanto, uma maior temperatura sujeita a combustão infere uma maior segurança de manuseio do ligante. Concernente a Ductilidade, o CAP 50/70 obteve um maior parâmetro relativo ao indicado pela ANP, caracterizando boa consistência.

No caso da determinação da viscosidade do ligante betuminoso, ela se justifica pela necessidade de se conhecer o intervalo de temperatura para melhor recobrimento dos agregados na mistura, bem como a proporcionar uma amostra mais compactada. Nesta perspectiva, os testes de viscosidade em função das temperaturas de 135 e 150°C resultaram em valores superiores aos preconizados pela ANP, porém os dados aferidos para a temperatura de 177°C permaneceram dentro do intervalo.

Dessa forma, ao construir o gráfico Viscosidade x Temperatura conforme Figuras 28 e 29, observa-se que para os intervalos de valores da viscosidade necessária a mistura e compactação do compósito asfáltico afere-se, tanto para o ensaio em *Saybolt-Furol* como para o *Brookfield*, aproximadamente 162,5°C para aquecimento do material asfáltico e 155°C para compactação da mistura. Ressalta-se que os agregados devem ser aquecidos 10 a 15°C acima do ligante, sem ultrapassar 177°C (BERNUCCI *et al.*, 2008).

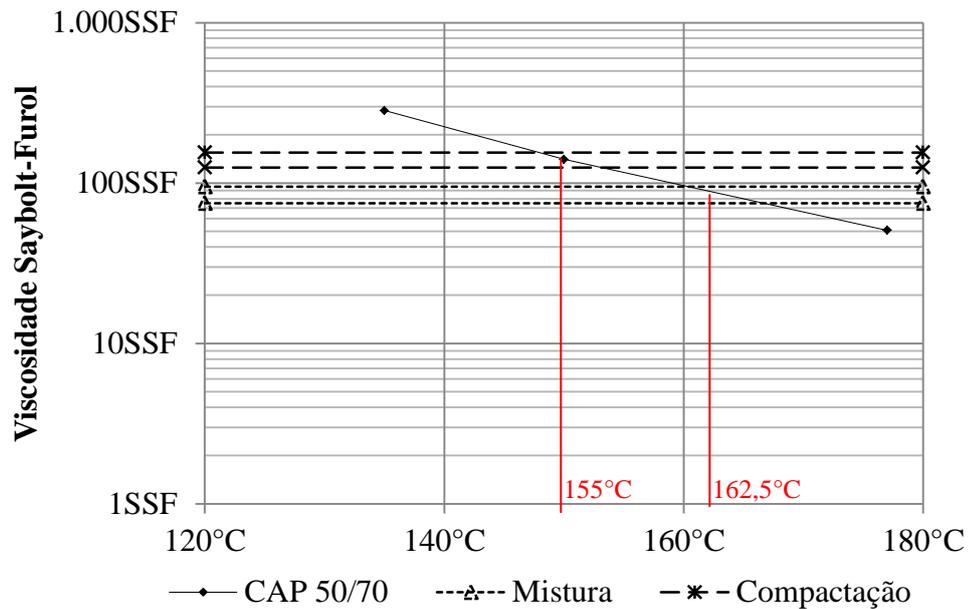


FIGURA 28 - Gráfico Viscosidade Saybolt Furol do CAP

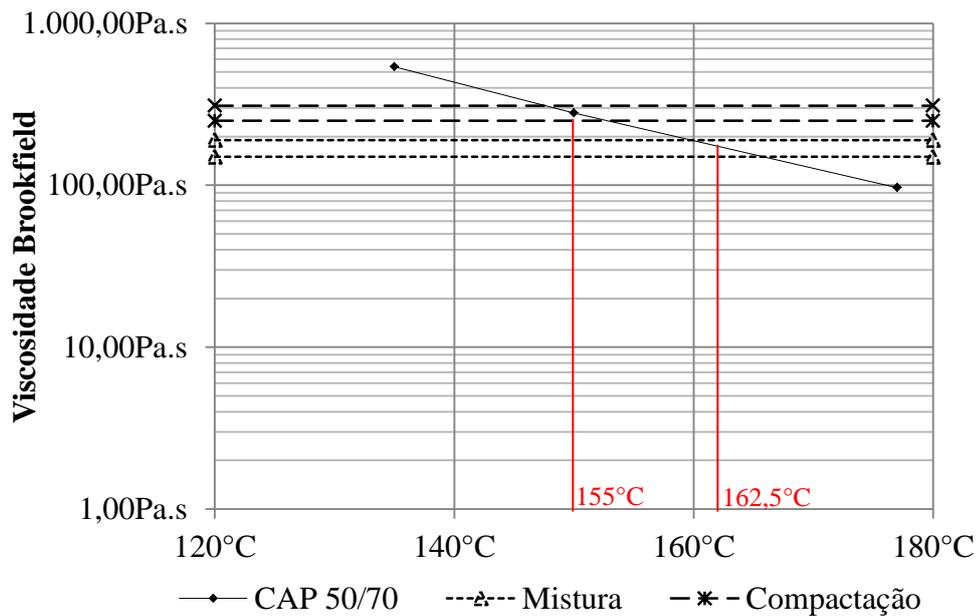


FIGURA 29 - Gráfico Viscosidade Brookfield do CAP

4.1.2. Agregados

Consoante o Capítulo 1, realizou-se uma análise entre misturas asfálticas do tipo SMA comparativamente quanto ao tipo de agregado graúdo utilizado — material tradicional (Brita) e o alternativo (RCD). Em complemento, a respeito do agregado miúdo e do fíler tem-se a caracterização da areia comercializada em Manaus e o cimento *Portland*.

Quanto à granulometria mostrada na Figura 30, nota-se a semelhança da curva granulométrica da Brita 1 e do RCD 1, ambos classificados como pedregulho, indicando, em geral, partículas entre 6 a 11mm de diâmetro. Atinente a areia residual, possibilita-se enquadrá-la como uma areia média pela escala granulométrica da ABNT, com 81,87% de grãos com diâmetros entre 0,2 a 0,6mm, e igualmente pela escala da ASTM com 68,04% de grãos com diâmetros entre 2,0 e 0,425mm. Por fim, o cimento atende ao preconizado na norma DNER-EM 367/97 no tocante a possuir mais de 65% dos grãos menores que 0,075mm.

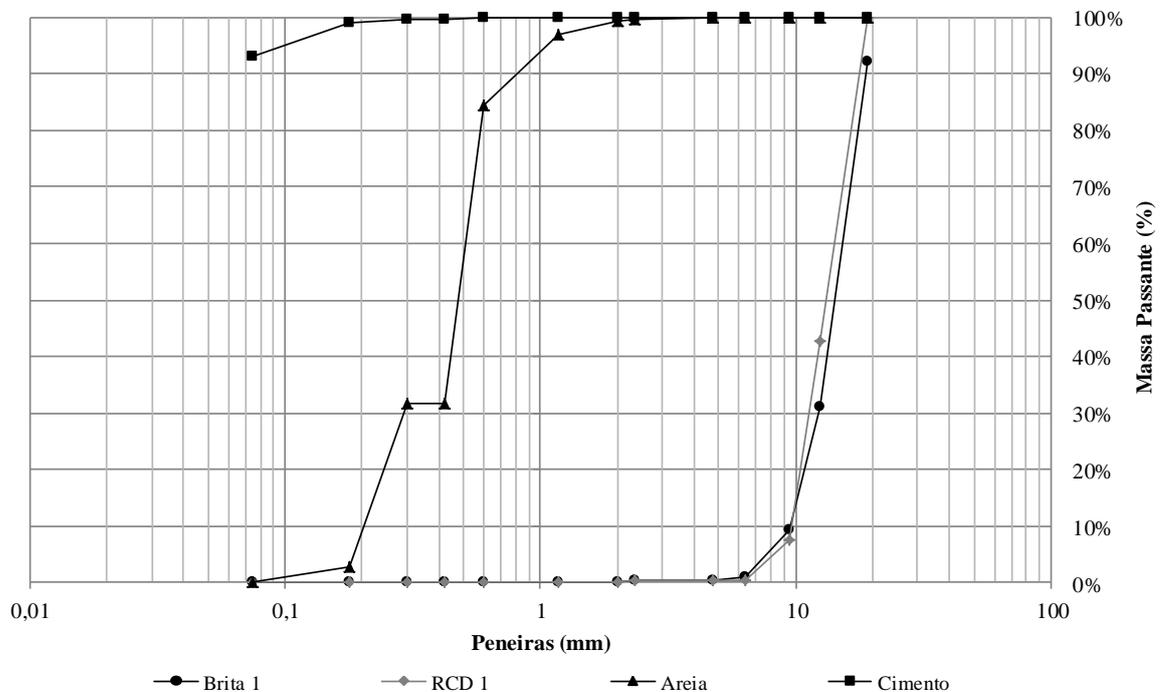


FIGURA 30 - Granulometria dos Agregados: Brita 1, RCD 1, Areia e Cimento *Portland*

Relativo às densidades dos materiais expostas na Tabela 8, os agregados apresentaram densidades reais na faixa 2.550 a 3.000Kg/m³. Para os agregados graúdos as densidades reais mostraram-se aproximadas, mas as densidades aparentes e saturadas distintas. Tal constatação provavelmente deve-se a maior quantidade de vazios, isto é, maior porosidade superficial do agregado reciclado, constatado pela alta absorção do material referente ao agregado granítico. Assim, esta porosidade do RCD, esquematizada na Figura

31, portanto mostra maior volume de vazios no agregado, consequentemente maior volume aparente relativo ao volume real, bem como maior massa na condição saturada pela absorção de água (água é mais pesada que o ar), resultando em maior densidade aparente saturada comparativamente a densidade aparente. Logo, pela porosidade irrelevante da Brita, esta apresentou as densidades reais, aparente e aparente na condição saturada com valores aproximados. Tal resultado também foi observado por MELO (2009).

TABELA 8 - Densidade e Absorção dos Agregados

Característica	Unid	RCD	BRITA	Areia	Cimento
Densidade Real (G_{sa})	Kg/m ³	2.550	2.680	2.650	3.010
Densidade aparente (G_{sb})	Kg/m ³	2.200	2.660	-	-
Densidade aparente na condição SS ($G_{sb_{ssd}}$)	Kg/m ³	2.340	2.670	-	-
Absorção	%	6,25%	0,25%	-	-

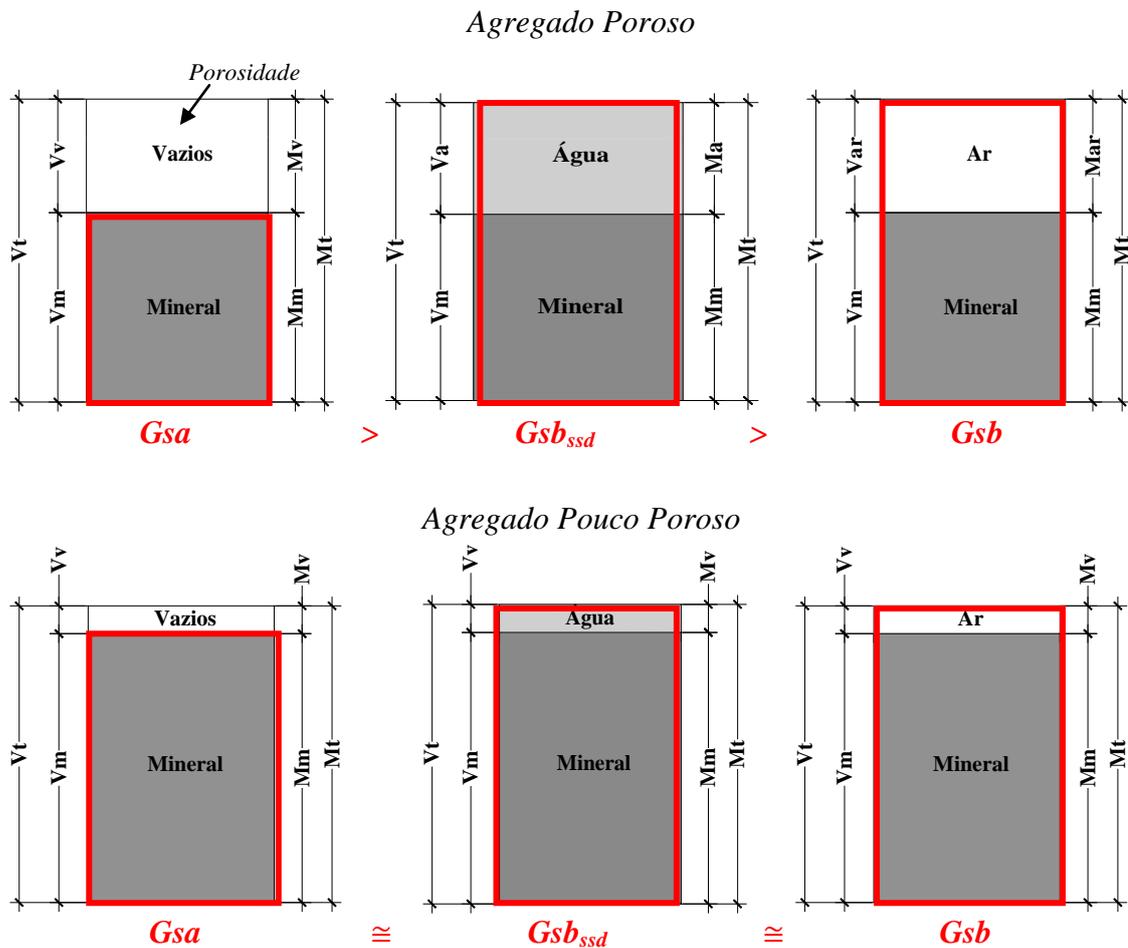


FIGURA 31 – Esquema das Variações dos Resultados de Densidade Real, Aparente e Aparente na condição Saturada para Agregados Porosos e Pouco Porosos

Outra característica importante para os agregados graúdos empregados em compósitos SMA é o valor do desgaste por abrasão *Los Angeles*, devido à granulometria da mistura inferir um maior contato grão a grão. Em NAPA (2002) recomenda-se para este parâmetro o valor máximo de 30%, embora considere que agregados com valores acima dessa porcentagem tenham sido usados com sucesso mesmo com um colapso dos agregados durante a compactação. Os resultados alusivos aos agregados aqui utilizados foram 17% e 44% para Brita (Figura 32) e RCD (Figura 33), respectivamente.

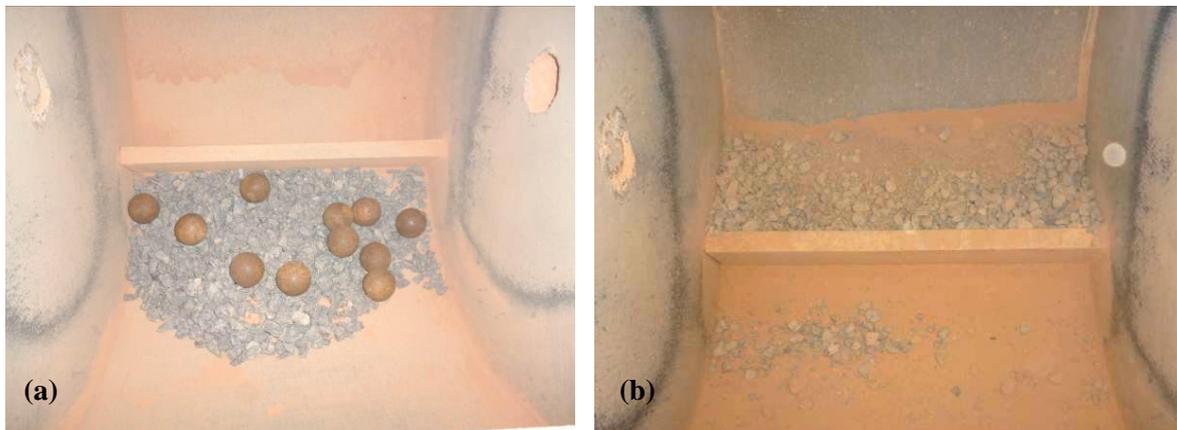


FIGURA 32 - Ensaio de Abrasão da Brita 1: (a) Antes da rotação e (b) Após a rotação

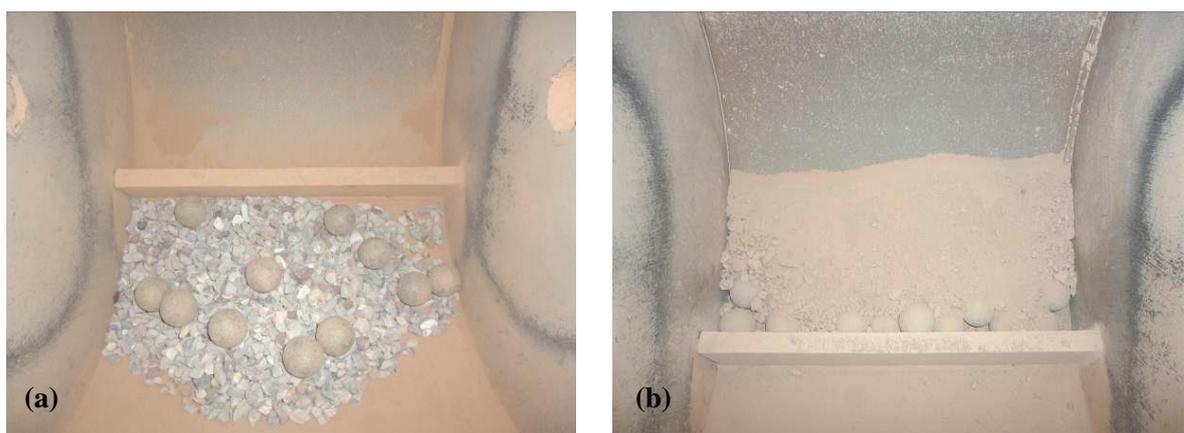


FIGURA 33 - Ensaio de Abrasão do RCD 1: (a) Antes da rotação e (b) Após a rotação

BESSA *et al.* (2010) utilizaram agregados do tipo graníticos com abrasão de 42,2% em misturas SMA, apresentando melhores resultados para a Resistência à Tração e Módulo de Resiliência respectivos de 1,11MPa e 3790MPa, relativo as demais misturas analisadas do tipo concreto asfáltico. Da mesma forma OLIVEIRA FILHO (2007) empregou SMA com agregado Brita, tendo desgaste igual a 47,0%, e SILVA (2005) agregados gnaises com material mostrando abrasão de 32%, onde concluíram a satisfatoriedade do material, mesmo com os citados valores superiores a 30%.

No estudo em pauta os resultados desse parâmetro para o agregado reciclado indicaram comportamento semelhante ao observado em ZHU *et al.* (2012), o qual estudou um agregado composto de resíduos de concreto, tijolo cerâmico, resíduos de vidro e madeira derivados das demolições de estruturas afetadas por terremotos na China. Neste trabalho aferiram-se parâmetros físicos e mecânicos de agregados que resultou em 37,8% de abrasão *Los Angeles*, alta absorção (6,76%), bem como elevado teor “ótimo” para as misturas asfálticas (de 5,57% a 7,58%), devido à superfície porosa predominante no material reciclado.

Quanto à adesividade os agregados graúdos indicaram resultados análogos (Figura 34), destacando-se o agregado reciclado com melhor cobertura da película asfáltica após as condições do ensaio, possivelmente pela sua rugosidade superficial comparativamente a Brita que possui aparência superficial lisa. Por fim, ambos os agregados graúdos resultaram na forma cúbica com as razões largura/comprimento e espessura/largura maiores que 0,50.

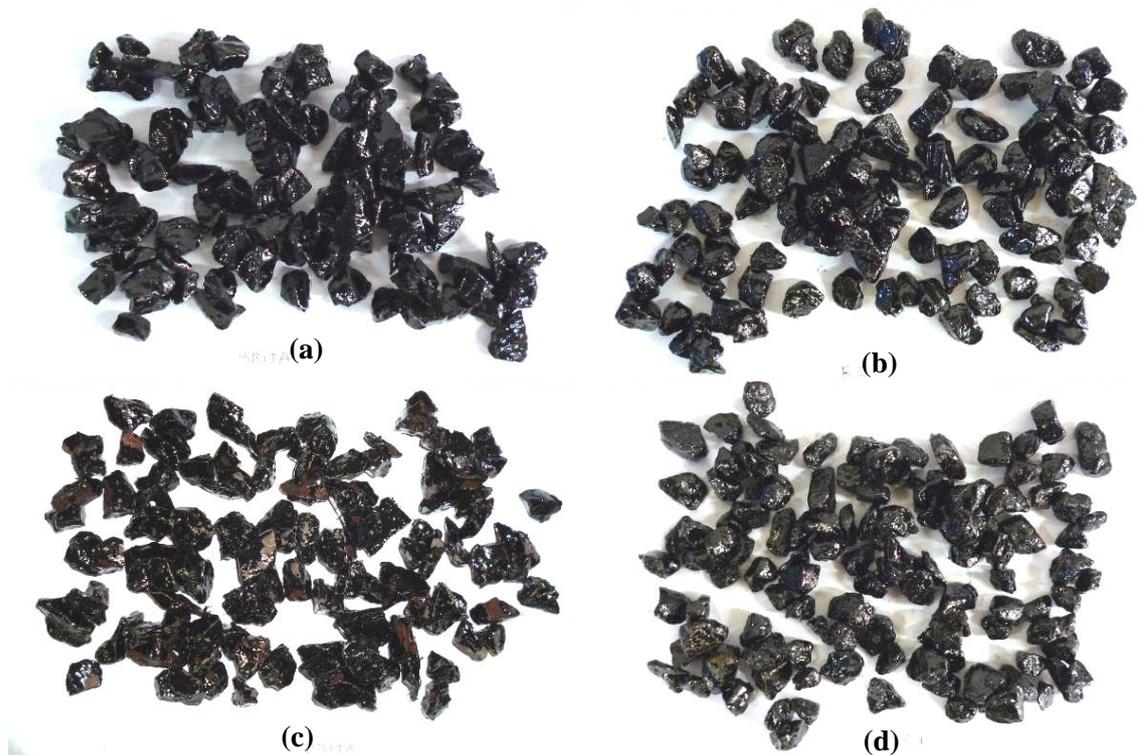


FIGURA 34 - Ensaio de Adesividade do Agregado Graúdo: Antes do Ensaio — (a) Brita e (b) RCD e Depois do Ensaio — (c) Brita e (d) RCD

4.1.3. Fibra do Curauá

Relativo à densidade real da fibra do curauá aferiu-se o valor de 1.430Kg/m^3 segundo o experimento preconizado em DNER-ME 084/95. Perante a Tabela 9, este parâmetro é análogo ao deparado em MARINELLI *et al.* (2008) e SILVA *et al.* (2009). Comparativamente a fibra tradicionalmente aplicada em misturas SMA — fibra de Celulose, esta é expressamente maior, podendo gerar compósitos asfálticos mais pesados.

TABELA 9 - Densidade da Fibra do Curauá

Fibra	Referência	Densidade (Kg/m^3)
Curauá	Neste Trabalho	1.430
	MARINELLI <i>et al.</i> (2008)	1.400
	SILVA <i>et al.</i> (2008)	1.380
Celulose	SOUZA (2007)	480 – 530

4.2. DOSAGEM DA MISTURA ASFÁLTICA

A associação dos agregados foi enquadrada nos limites inferiores e superiores de misturas SMA com tamanho máximo nominal de 19,0mm, conforme disposto em NAPA (2002). Na Figura 35 têm-se as curvas granulométricas da dosagem mineral (mistura brita e mistura RCD), indicando curvas semelhantes, devido a granulometria similar dos materiais graúdos, único partícipe variante nas misturas. Tal enquadramento da dosagem mineral foi realizado inicialmente com 80% de agregado graúdo, 10% de areia e 10% cimento, mas ao executar a dosagem Marshall obtiveram-se teores de CAP fora do intervalo referenciado nas normas e bibliografias para SMA. Com isso, determinou-se a dosagem mineral, para ambas as misturas propostas, com 75% de graúdo, 15% de miúdo e 10% de fíler (Figura 35) para atender as especificações de misturas SMA quanto ao teor de projeto de CAP, transpondo-se discretamente do limite superior nas aberturas de 0,40 a 3,5mm em ambas as misturas propostas.

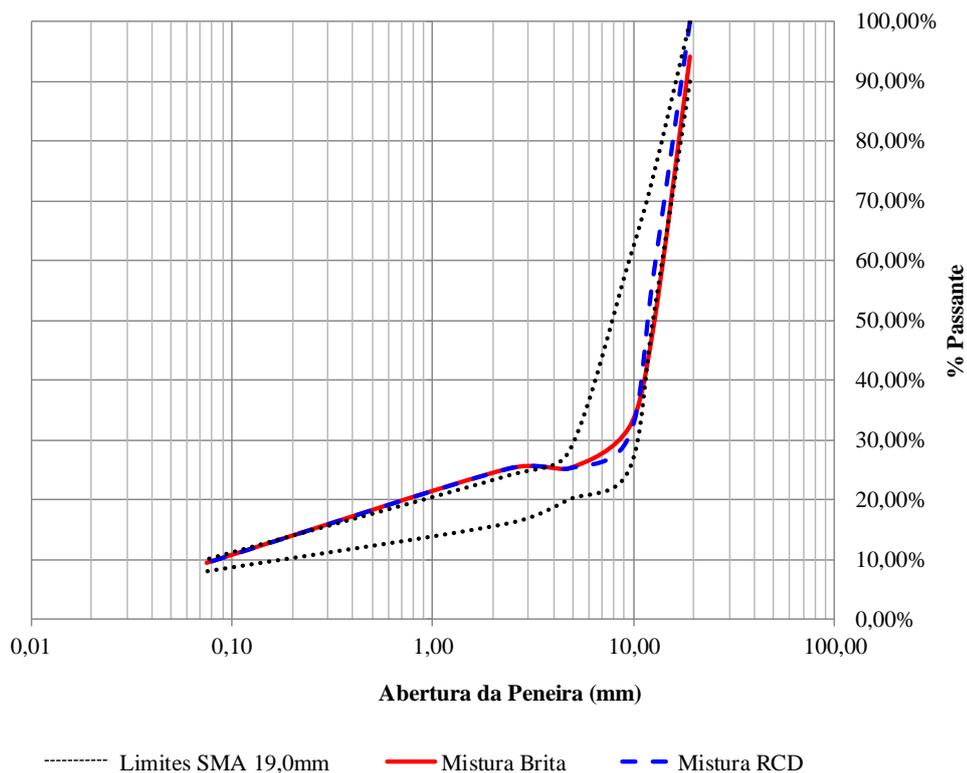


FIGURA 35 - Enquadramento Granulométrico da Dosagem Mineral (TMN 19,00mm)

A dosagem mineral selecionada foi adicionada os teores de 5.5%, 6,0%, 6,5%, 7,0% e 7,5% de CAP, separadamente. Em seguida executaram-se misturas na condição solta e compactada, em triplicata para cada teor de ligante asfáltico. Logo, mediu-se a densidade máxima medida (DMM ou Gmm) e densidade aparente (Gmb) dos compósitos.

Como se expõe na Figura 36, os valores de DMM são maiores relativos aos de Gmb. Tal perspectiva dá-se provavelmente pelo DMM ser aferido por meio de uma amostra solta, sem os vazios ocasionados em uma amostra compactada para um dado volume. Assim, no DMM o volume é formado somente pelos agregados e ligante asfáltico com um pequeno percentual de vazios correspondente a formação de alguns grumos entre estes materiais. De outra maneira, as misturas com Brita têm os maiores valores das citadas densidades quanto ao compósito com o agregado de RCD, este fato ocorre possivelmente devido a sua maior densidade real, uma vez que o agregado graúdo é o único variante nas misturas estudadas. Quanto à inserção da fibra, ambas as misturas houveram menores variações da densidade aparente e na mistura com RCD ocasionou um pequeno decréscimo na DMM e na Gmb.

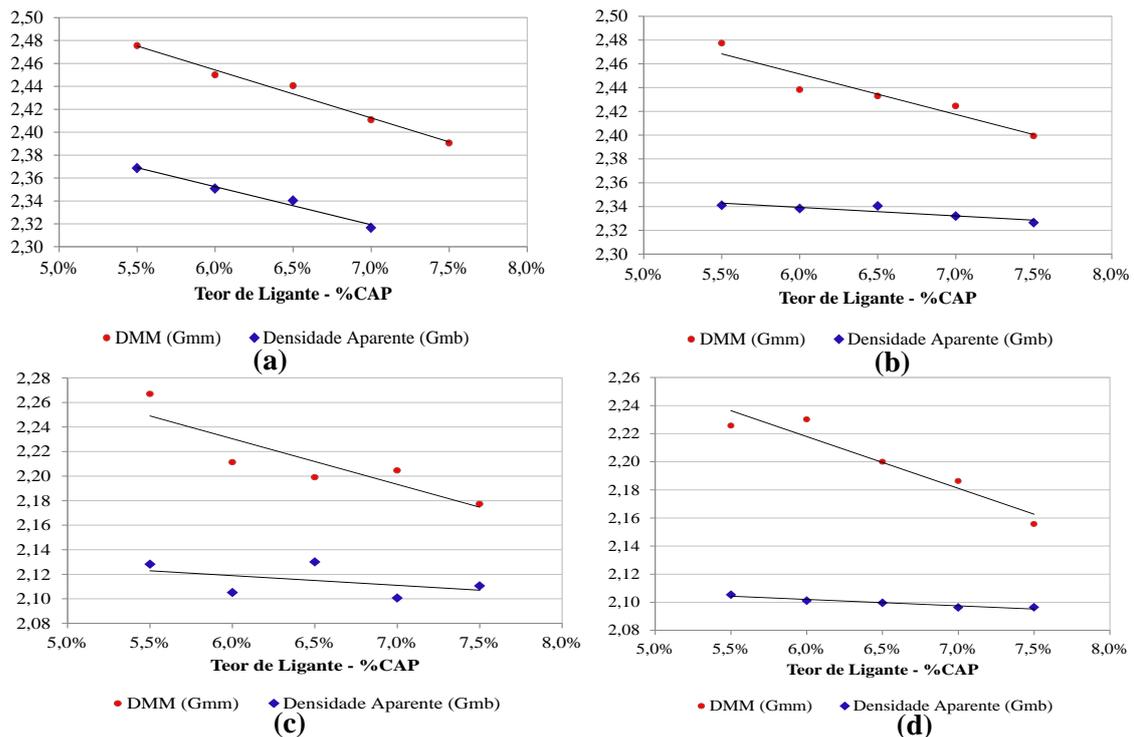


FIGURA 36 - Massa Especifica Solta (Gmm) e Compactada (Gmb) dos Compósitos com: (a) BRITA, (b) BRITA-CURAUÁ, (c) RCD e (d) RCD-CURAUÁ

Por meio dos resultados de Gmm e Gmb, calculou-se o Volume de Vazios alcançando os resultados presentes na Figura 37. Com tais dados, pondera-se que a inserção da fibra ao compósito com Brita proporcionou um maior incremento dos valores do mencionado parâmetro. Comparativamente aos agregados graúdos, notou-se que o Vv para um mesmo percentual de ligante é maior para a mistura com a presença do agregado reciclado, em conformidade com seu potencial absorptivo, isto é, uma parcela do ligante é absorvido ao invés de preencher os vazios remanescentes do esqueleto mineral.

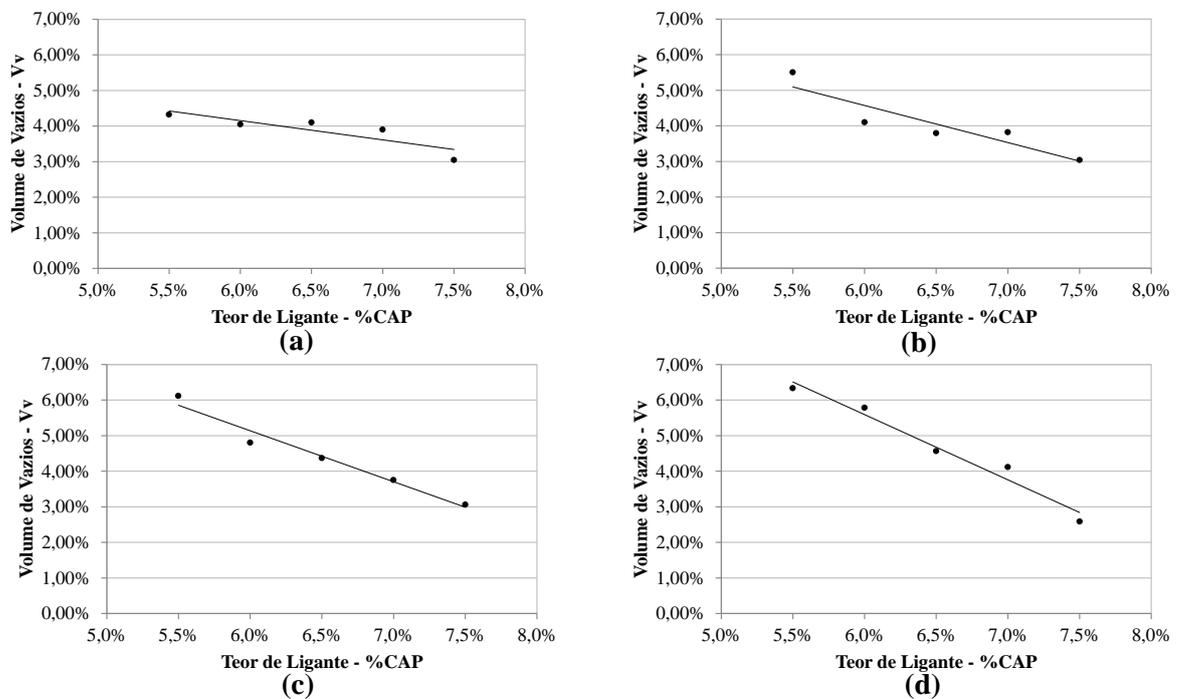


FIGURA 37 - Teor de Ligante Asfáltico x Volume de Vazios — (a) BRITA, (b) BRITA-CURAUÁ, (c) RCD e (d) RCD-CURAUÁ

Em complemento, ressalta-se que em todas as misturas houve o decréscimo do Vv com o aumento do ligante betuminoso, denotando coerência nos resultados. Todavia, atenta-se que a inclinação das retas de Vv para as misturas com RCD é maior que as com Brita, favorecendo menores disparidade nos valores de volume de vazios quando alterado o teor de CAP. Por exemplo, com o aumento de 0,5% de Vv, os teores de CAP aumentam em 0,93%, 0,5%, 0,4% e 0,3%, respectivamente nas misturas BRITA, BRITA-CURAUÁ, RCD e

RCD-CURAUÁ. Com isso, conclui-se que maior é o incremento de CAP nas misturas com Brita quando modificado o volume de vazios e tal incremento é reduzido com a adição das fibras.

Pelos gráficos da Figura 37 determinou-se uma equação linear para cada tipo de mistura. Em seguida, foram calculados os teores de CAP que inferiam um Volume de Vazios de 4% para cada mistura (Tabela 10). Como a única variável nas misturas é o agregado graúdo implementado pode-se deduzir que o RCD consome mais ligante betuminoso para ocasionar 4% de Vv, provavelmente devido a uma parcela ser absorvida pelo agregado, e outra ter como função o preenchimento dos vazios. De outro modo, a fibra do curauá inferiu em maior incremento de CAP no compósito com Brita.

TABELA 10 - Aferição do Teor de CAP para 4% de Volume de Vazios

Mistura	%CAP	%Vv	Equação (%CAP,%Vv)	%CAP para 4% de Vv
SMA BRITA	5,5	4,32	$y = -0,54x + 0,0739$	6,28
	6,0	4,05		
	6,5	4,10		
	7,0	3,90		
	7,5	3,04		
SMA BRITA-CURAUÁ	5,5	5,50	$y = -1,042x + 0,1077$	6,50
	6,0	4,10		
	6,5	3,80		
	7,0	3,82		
	7,5	3,04		
SMA RCD	5,5	6,12	$y = -1,24x + 0,1245$	6,82
	6,0	4,80		
	6,5	3,14		
	7,0	4,71		
	7,5	3,06		
SMA RCD-CURAUÁ	5,5	6,33	$y = -1,83x + 0,1659$	6,88
	6,0	5,79		
	6,5	4,57		
	7,0	4,11		
	7,5	2,59		

Atinente aos vazios de agregado graúdo (VCA), foram adotados os valores de G_{ca} e γ_s , respectivamente de $2,66\text{g/cm}^3$ e 1450Kg/m^3 para mistura com Brita e $2,2\text{g/cm}^3$ e 1260Kg/m^3 para o compósito com RCD. A fração graúda do agregado em relação ao peso total da mistura (P_{CA}) foi correlacionada com o tamanho máximo nominal de 19mm para

ambos agregados. Os dados de VCA_{MIX} e VCA_{DRC} estão descritos na Tabela 11 e atendem o requisito do VCA_{MIX} ser menor que o VCA_{DRC} . Em se tratando de tais parâmetros, certifica-se que são menores para a mistura com RCD em razão da massa específica do agregado resíduo e do compósito serem inferiores em confronto com o material convencional (Brita) e a mistura com este.

TABELA 11 - VCA (Voids in the Coarse Aggregate) das misturas SMA

Mistura	%CAP	VCA_{MIX}	VCA_{DRC}
SMA BRITA	5,5	11,23	45,38
	6,0	11,90	
	6,5	12,29	
	7,0	13,18	
	7,5	13,57	
SMA BRITA-CURAUÁ	5,5	12,26	45,38
	6,0	12,37	
	6,5	12,28	
	7,0	12,61	
	7,5	12,81	
SMA RCD	5,5	3,52	42,61
	6,0	4,57	
	6,5	3,44	
	7,0	4,77	
	7,5	4,32	
SMA RCD-CURAUÁ	5,5	5,49	42,61
	6,0	4,75	
	6,5	4,82	
	7,0	4,97	
	7,5	4,81	

Em suplemento, calculou-se a relação betume/vazios (RBV) e realizou-se a dosagem Marshall para todas as misturas, conforme as Figuras 38 a 41. Por meio dos gráficos dispostos nas citadas figuras, compreende-se que maiores teores de CAP são necessários para a mistura com RCD perante os limites de V_v e RBV obtidos por meio de G_{mm} e G_{mb} . Tal fato pode ser consequência da absorção, como analisado em MELO *et al.* (2008).

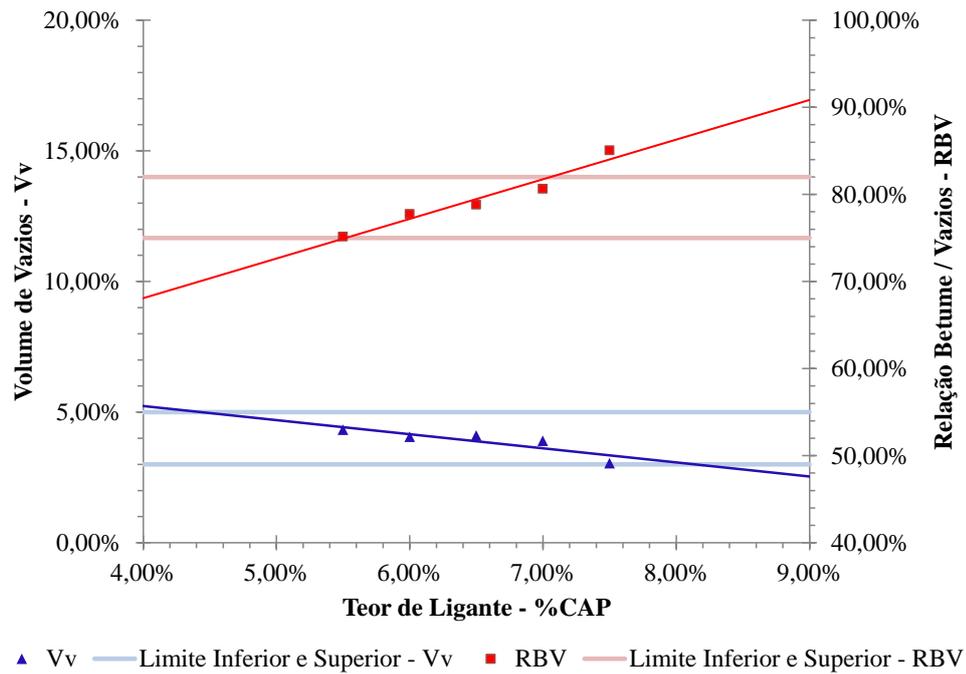


FIGURA 38 - Dosagem do Teor de Ligante – Mistura SMA BRITA (sem Fibra)

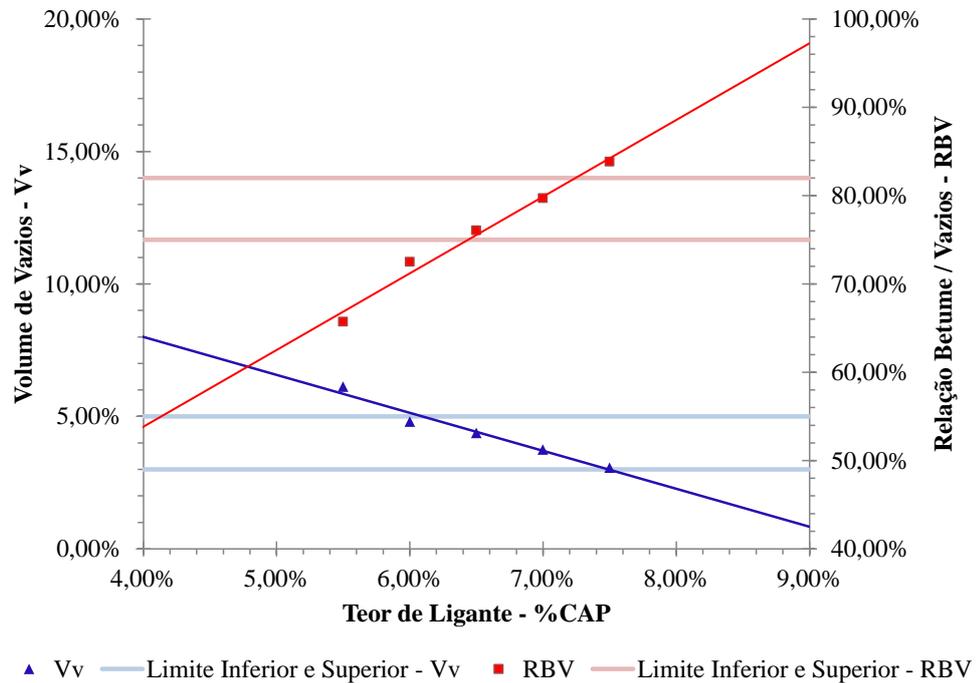


FIGURA 39 - Dosagem do Teor de Ligante – Mistura SMA RCD (sem Fibra)

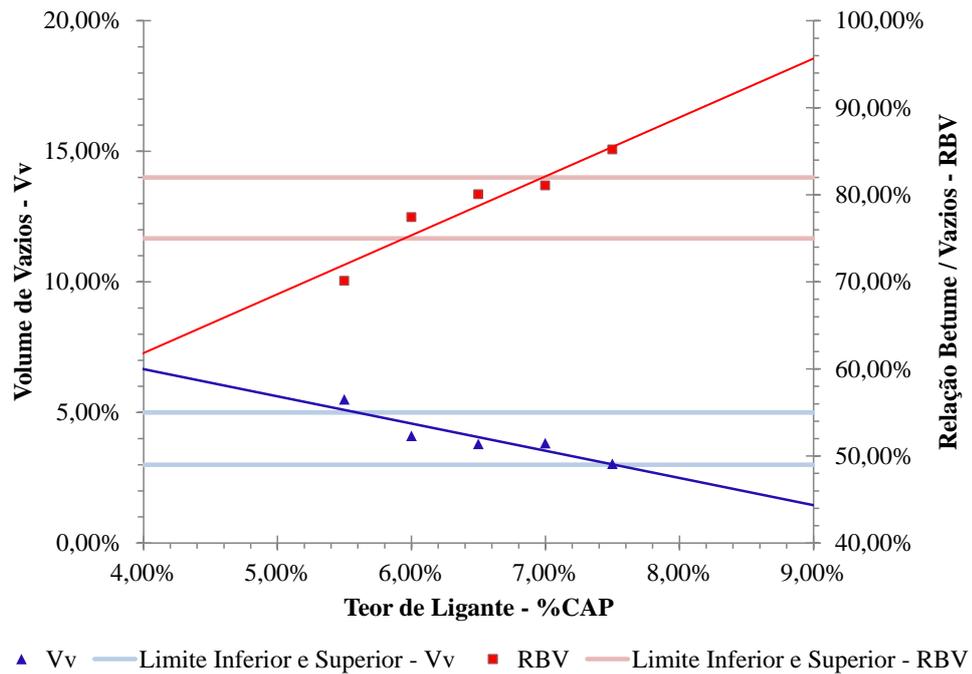


FIGURA 40 - Dosagem do Teor de Ligante – Mistura SMA BRITA (com 0,3% Fibra Curauá)

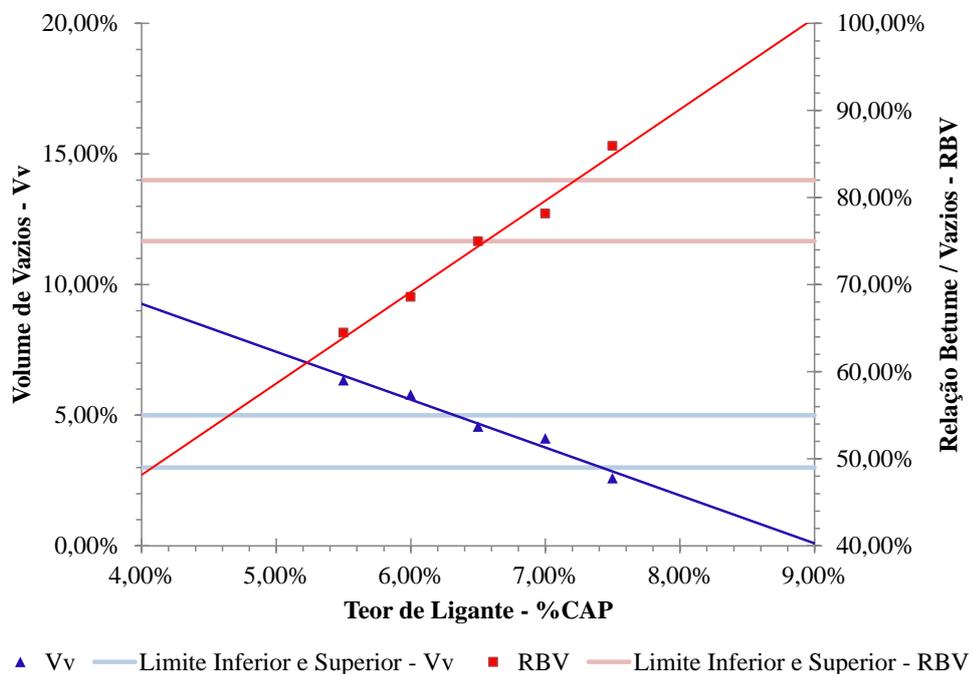


FIGURA 41 - Dosagem do Teor de Ligante – Mistura SMA RCD (com 0,3% Fibra Curauá)

Desta maneira, observou-se que os percentuais obtidos pela dosagem Marshall são semelhantes aos alcançados pela indicação do Volume de Vazios em 4%. Desta maneira, selecionaram-se os teores de CAP da Tabela 12 para confecção das misturas asfálticas a

serem submetidas aos ensaios mecânicos, com aspecto visual como ilustrado na Figura 42. Assim, para ambos os métodos também se destaca o aumento do percentual de ligante com a inserção da fibra corroborada pela maior superfície específica adquirida. Conforme PELTONEN (1991, apud ABTAHI, SHEIKHZADEH & HEJAZI, 2010) a adição de fibras ao asfalto é muito semelhante à adição de agregados muito finos a este, sendo que a fibra pode estabilizar os ligantes asfálticos evitando o escorrimento do mesmo.

TABELA 12 - Teor “Ótimo” de Ligante Asfáltico

Código	Mistura Mineral	%CAP
SMA BRITA	75% Brita + 15% Areia + 10% Cimento	6,28%
SMA RCD	75% RCD + 15% Areia + 10% Cimento	6,82%
SMA BRITA-CURAUÁ	75% Brita + 15% Areia + 10% Cimento + 0,3% Fibra Curauá	6,50%
SMA RCD-CURAUÁ	75% RCD + 15% Areia + 10% Cimento + 0,3% Fibra Curauá	6,88%



FIGURA 42 – Seção dos Corpos de Prova na Dosagem Mineral selecionada e Teor “Ótimo” de CAP

O aumento do teor de CAP nos SMA’s com fibra também foi adquirido em SUCHISMITA (2009), cuja mistura mineral de tamanho máximo nominal de 19,0mm e

ligante 60/70 apresentaram um acréscimo de 0,5% de CAP a cada 0,2% de fibra adicionada, salientando-se que os agregados graúdos foram caracterizados com absorção de 0,09%.

Em VALE (2007), houve discreta alteração nos teores de CAP com a inserção das fibras, onde pela dosagem Marshall foi determinado para o SMA com fibra de coco um teor de projeto de 6,2%, com fibra de celulose de 6,0% (impregnada com ligante asfáltico para melhor dispersão na mistura) e sem fibra de 6,0%. Portanto apresentando elevação discreta no compósito com fibra natural e diferentemente para com a fibra industrial.

Indicativo a participação do agregado de resíduo em compósitos asfálticos, trabalhos com aplicação em misturas densas, como o concreto asfáltico, aferiram o aumento do teor de CAP de 18% a 75% quando comparado a misturas com agregados aluvionares (MOTTA, 2005; GUIMARÃES, 2009 e MELO, 2009).

4.2.1. Ensaio de Escorrimento

O ensaio de escorrimento realizou-se na mistura asfáltica dosada sem a fibra e nas temperaturas: (i) do ligante para a mistura, determinada pelo ensaio de viscosidade — 162,5°C (Figuras 43 e 46); e (ii) na citada temperatura acrescida de 15°C — 177,5°C (Figuras 44 e 45). Este experimento consistiu na análise do escorrimento das misturas, com RCD e com Brita, sem adição de fibra (0%), e em compósitos com 0,3% e 0,5% de fibra do curauá, o qual observou-se a redução do escorrimento nas misturas com a fibra, bem como maior escorrimento para a menor temperatura (162,5°C).

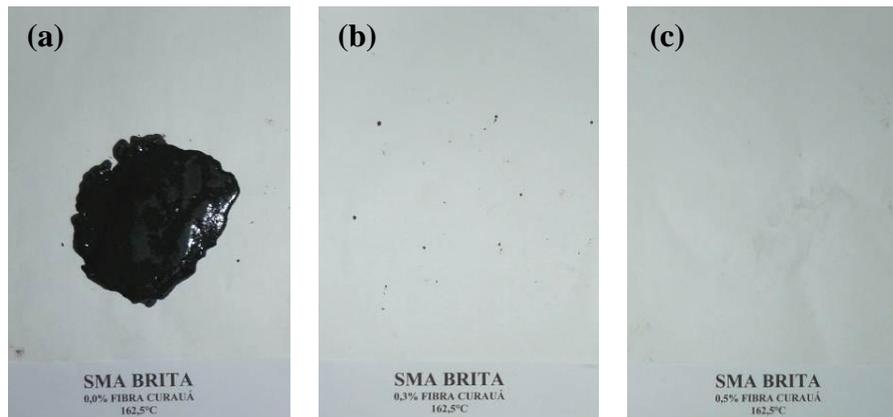


FIGURA 43 - Ensaio de Escorrimento – Mistura SMA BRITA – 162,5°C: (a) 0%, (b) 0,3% e (c) 0,5% de fibra do curauá

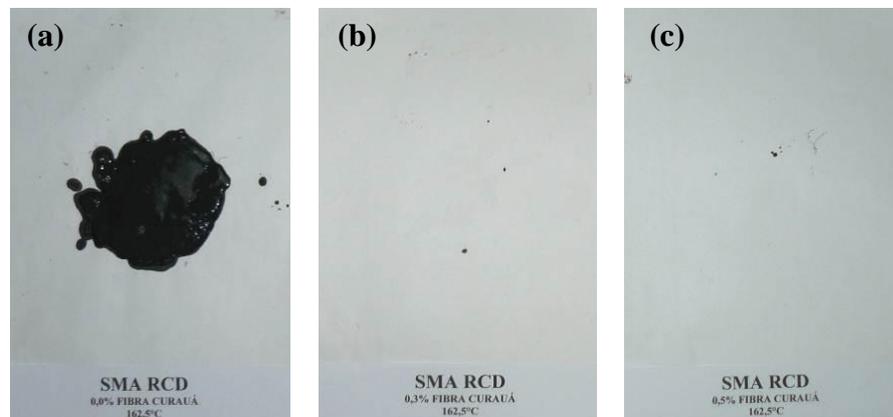


FIGURA 44 - Ensaio de Escorrimento – Mistura SMA RCD – 162,5°C: (a) 0%, (b) 0,3% e (c) 0,5% de fibra do curauá

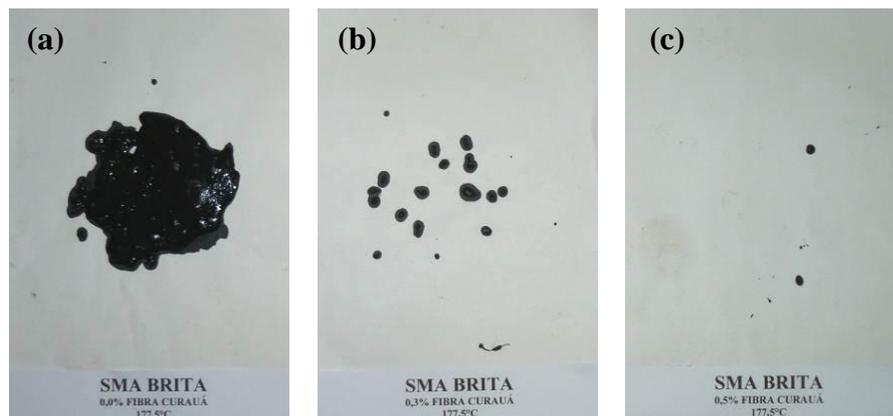


FIGURA 45 - Ensaio de Escorrimento – Mistura SMA BRITA – 177,5°C: (a) 0%, (b) 0,3% e (c) 0,5% de fibra do curauá

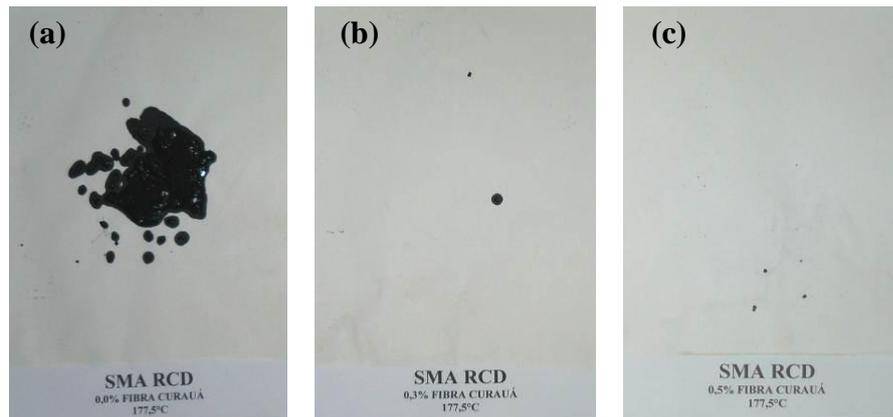


FIGURA 46 - Ensaio de Escorrimento – Mistura SMA RCD – 177,5°C: (a) 0%, (b) 0,3% e (c) 0,5% de fibra do curauá

As especificações preconizam um escorrimento de até 0,30% para satisfatoriedade na implementação das fibras a fim de evitar o escorrimento do masticado em campo. Pelos resultados expostos na Tabela 13 observam-se maiores escorrimentos para a temperatura de 162,5°C, fato congênere ao encontrado em OLIVEIRA FILHO (2007), com exceção da mistura SMA com Brita e 0,3% da fibra de curauá. Em geral, isto ocorre devido ao conceito da tensão superficial de um fluido que varia com a temperatura, ou seja, regiões superficiais mais quentes tem menor tensão que regiões mais frias (MONTEIRO, 2006). Desta maneira, entendendo-se que o aumento da temperatura do CAP reduz a tensão superficial, este pode ser absorvido pelo agregado e promover menor escorrimento. Porém, como o agregado granítico possui menor potencial absorptivo, este suscita maior escorrimento se comparado com o agregado reciclado, conforme nota-se na Tabela 13.

TABELA 13 - Resultado do ensaio de Escorrimento

Mistura	Teor de Fibra	162,5°C	177,5°C
SMA BRITA	0,0%	4,41%	3,53%
SMA RCD	0,0%	2,69%	1,07%
SMA BRITA	0,3%	0,08%	0,14%
SMA RCD	0,3%	0,10%	0,09%
SMA BRITA	0,5%	0,09%	0,04%
SMA RCD	0,5%	0,06%	0,05%

Evidencia-se que 0,3% da fibra de curauá foram necessárias para enquadrar a mistura no limite do escorrimento, alcançando 0,08% a 0,14%. Um menor volume de fibra, se comparado a fibras plásticas do estudo de BINDU & BEENA (2010), precisaria de 9 a 10% para atingir um valor de semelhante escorrimento. Por outro lado, SOUZA (2007) com a participação de 0,3% de fibra de celulose, o escorrimento da mistura foi de 0,05% para o CAP 30/45 e 0,19% para o CAP 50/70. Da mesma maneira, VALE (2007) obteve em média 0,305% de escorrimento com uso de 0,3% de fibra de coco e 0,02% com 0,3% de fibra de celulose.

4.3. ENSAIOS MECÂNICOS

Devido à submissão dos corpos de prova às temperaturas de 25°C, 40°C e 60°C para o ensaio de RT, e 25°C e 40°C para o ensaio de MR, houve a preocupação de aferir os dados de ruptura concernentes ao material com equilíbrio térmico. Como 25°C é comumente a temperatura das amostras em laboratório climatizado, nas temperaturas de 40°C e 60°C foi observada a necessidade de manter os corpos de prova por, pelo menos, 1 hora na câmara ambiental.

Contudo, como a câmara ambiental se baseia na temperatura do ar, também se notou que esta tem que estar em uma temperatura maior que a requerida para o compósito, a fim de que as temperaturas medidas nos corpos de provas sejam igualmente a temperatura desejada. Assim, com a temperatura da câmara 12°C acima da inferida para os ensaios, ou seja, 52°C ou 72°C, os compósitos alcançaram equilíbrio térmico em 40°C ou 60°C, respectivamente. Então, para controle verificava-se a temperatura das amostras durante e logo após o ensaio, conforme as Figuras 47 a 49.

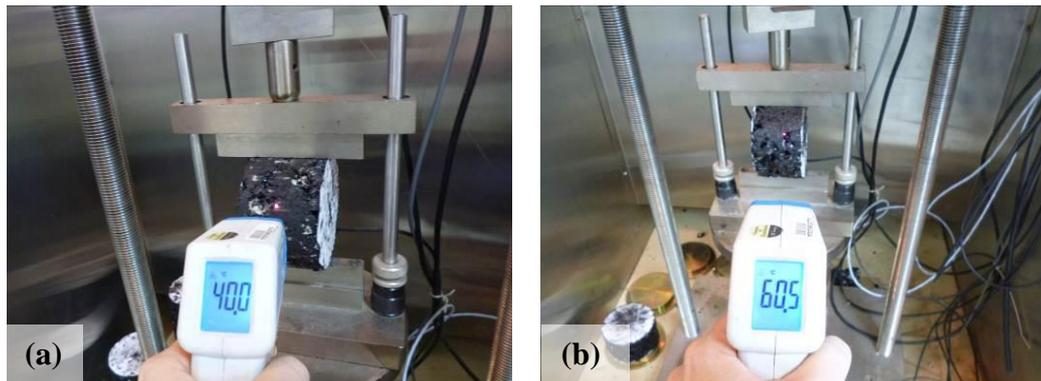


FIGURA 47 - Ensaio de Resistência à Tração - Antes da Ruptura: Acondicionamento a (a) 40°C e (b) 60°C

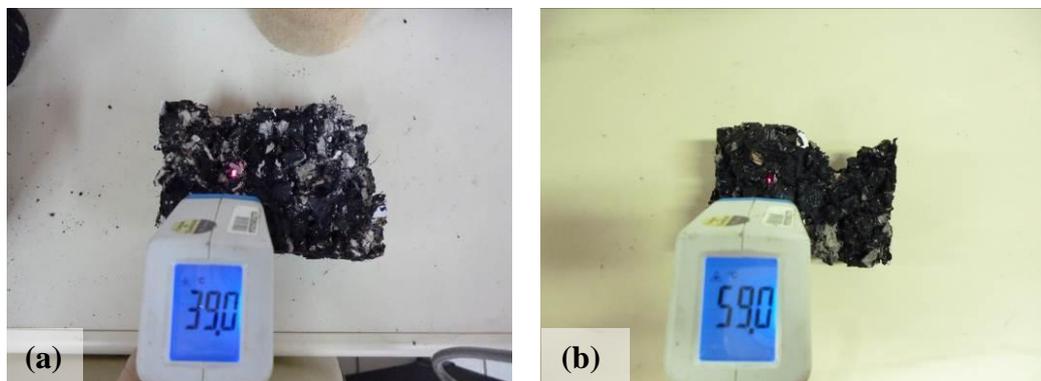


FIGURA 48 - Ensaio de Resistência a Tração - Após a Ruptura: Medição da Temperatura Interna do Corpo de Prova para o Ensaio a (a) 40°C e (b) 60°C

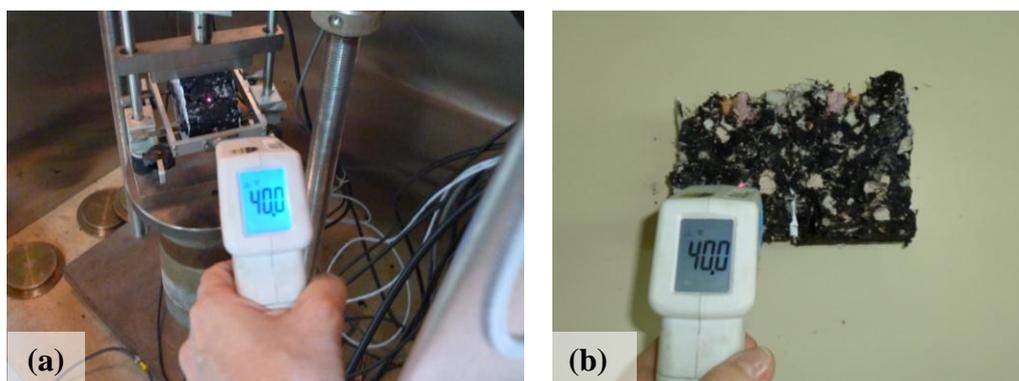


FIGURA 49 - Ensaio de Módulo de Resiliência a 40°C - Medição da Temperatura do Corpo de Prova: (a) Externa antes do experimento e (b) Interna com abertura do CP após o experimento

4.3.1. Resistência à Tração

Relativo aos resultados da RT, o gráfico da Figura 50 expõe que: a) a presença do agregado RCD indicou melhor desempenho frente às misturas com o material granítico, indiferentemente da inserção da fibra; e b) que a participação da fibra contribuiu para um

aumento da RT em 13,6% e 15,4%, respectivamente no compósito com Brita a 40°C e com RCD a 60°C. Nos demais ensaios houve redução do valor da RT de 3% a 14% para a mistura com Brita e em torno de 5,4% para a mistura com RCD, de acordo com a Tabela 14.

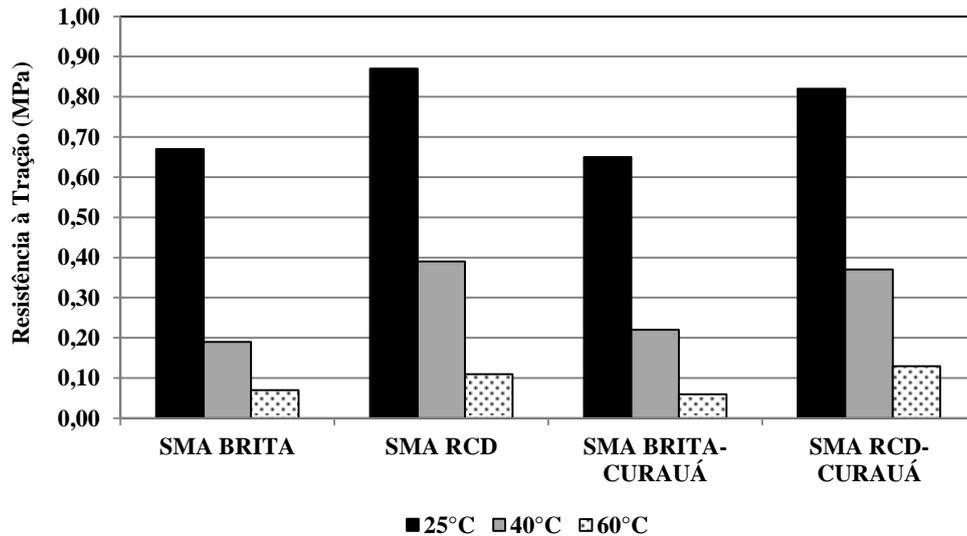


FIGURA 50 - Resultados de Resistência à Tração, em MPa

TABELA 14 - Influência da Fibra nos Compósitos quanto a RT

Mistura	Variação da RT		
	25°C	40°C	60°C
SMA BRITA → SMA BRITA-CURAUÁ	-3,0%	13,6%	-14,3%
SMA RCD → SMA RCD-CURAUÁ	-5,7%	-5,1%	15,4%

Pela Figura 51 e Tabela 15 é possível concluir que com o aumento da temperatura a RT da mistura diminuiu. Comparando as temperaturas para 25°C e 40°C houve uma diminuição na RT, em média de 69% para os SMA's com Brita e 55% para os SMA's com RCD, seja com ou sem fibra. Avaliando-se, ainda, o desempenho segundo o parâmetro RT, nota-se que nas temperaturas de 40°C e 60°C, obtém-se um decréscimo em média 68% para ambas as misturas. Por fim, avaliando-se as perdas relativas às temperaturas de 25°C e 60°C observou-se uma redução de 89,6% para os SMA's com Brita e 87,4% para o SMA com agregado reciclado. Nesta perspectiva, se permite avaliar que as perdas ao longo do aumento da temperatura são menores para os compósitos confeccionados com o RCD.

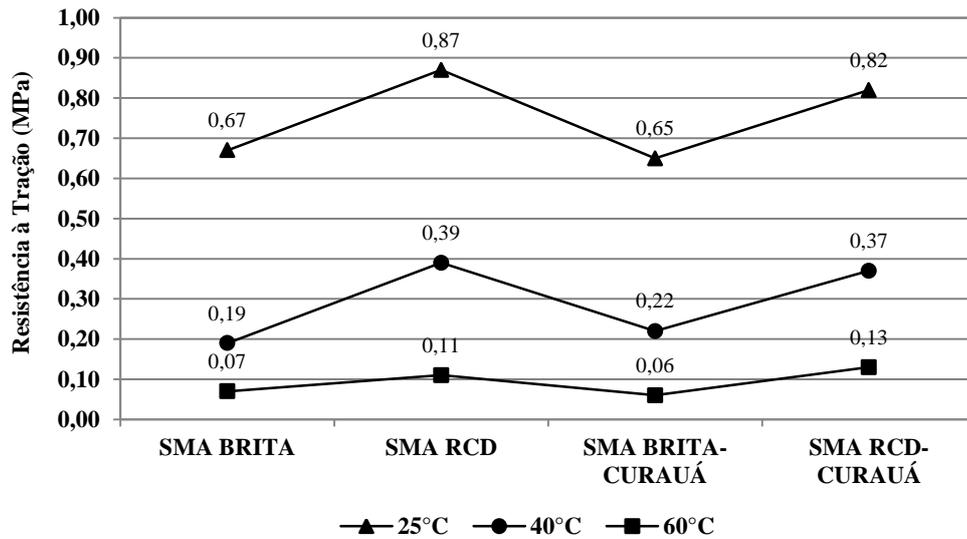


FIGURA 51 - Análise da Resistência à Tração em função da temperatura, em MPa

TABELA 15 - Decréscimo da RT com a temperatura

Mistura	Perdas		
	25°C→40°C	25°C→60°C	40°C→60°C
SMA BRITA	71,6%	89,6%	63,2%
SMA RCD	55,2%	87,4%	71,8%
SMA BRITA-CURAUÁ	66,2%	90,8%	72,7%
SMA RCD-CURAUÁ	54,9%	84,1%	64,9%

No caso dos compósitos com fibra do curauá a RT reduziu na temperatura de 60°C em 14,3% para o SMA com Brita, contudo aumentou de 15,4% para as misturas com RCD. Especialmente a esta temperatura, distingue-se a fragilidade do material, ou seja, após os ensaios observou-se a desagregação do compósito e facilidade de ruptura total no manuseio da amostra (Figura 52). Neste panorama, BRITO (2006) avaliou que o decréscimo da RT com o aumento da temperatura deve-se ao aumento do Volume de Vazios do corpo de prova.



FIGURA 52 - Aspecto do Corpo de Prova no Ensaio de Resistência à Tração a 60°C

PINTO (2002) avaliou a influência da temperatura no ensaio de RT de 25°C a 40°C, com incremento de 5°C, em misturas do tipo Concreto Asfáltico produzidos com 69.8% de agregados graúdos provenientes da fresagem de revestimento asfáltico, que mostrou a redução de 101% para as amostras com ligante modificado por polímero SBS e 121% nos compósitos confeccionados com o ligante convencional (CAP 50/60).

Em AHMADINIA *et al.* (2012), a Resistência à Tração também diminuiu nos SMA's, com agregado granítico produzidos com fibras de Polietileno Tereftalado (PET) em 0% a 10%, cuja RT variando de 0,42MPa para 0,30MPa, respectivamente ao mencionado percentual de fibras PET.

De outro modo, TOMCZAK, SATYANARAYANA & SYDENSTRICKER (2007) deduziram que fibras de curauá submetidas a ensaios mecânicos rápidos se comportam como um corpo elástico, com regiões cristalinas, resultando em aumento da RT. Ainda, ressalta-se a influência da perda de umidade das fibras de curauá, por exemplo, de 7,6% a 71,85°C, pois a água absorvida na fibra atua como plastificante e como redutora da rigidez desta.

4.3.2. Módulo de Resiliência

No ensaio de Módulo de Resiliência, se adotou o coeficiente de Poisson de 0,35 na temperatura de 25°C e de 0,35 e 0,50 em 40°C. No ensaio com 5% da Resistência à Tração (Figura 53), quando correlacionado com o compósito com Brita, as misturas com RCD apresentam melhor desempenho elástico em ambas as temperaturas, com destaque para 40°C. Esta temperatura indicou redução do MR em até 78,9% com uso de Brita e 66,0% com RCD, contudo a fibra melhora a performance em até 36,2% e 4,2% na ordem dos citados compósitos.

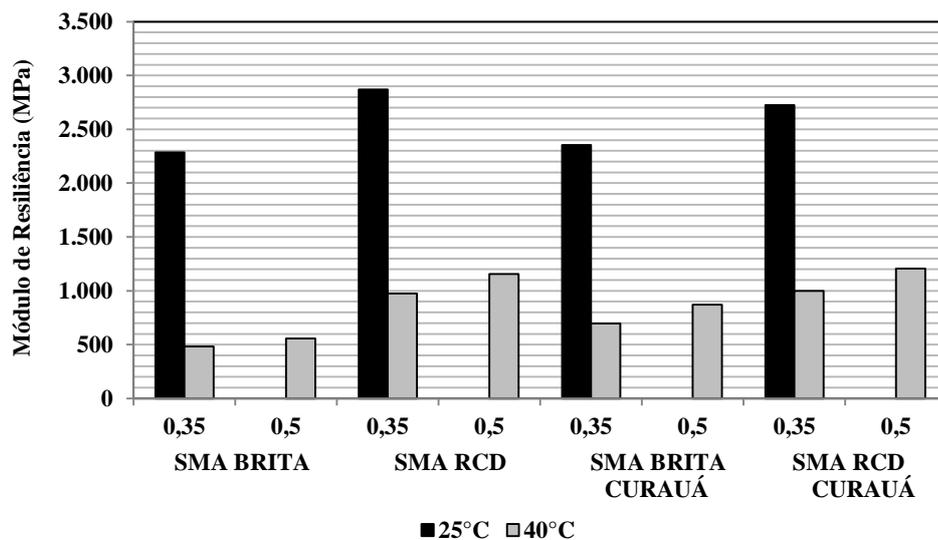


FIGURA 53 - Módulo de Resiliência com aplicação de 5% da RT, em MPa

Referente à aplicação de 15% da RT, expressa na Figura 54, todas as misturas mantiveram a redução do MR na maior temperatura, porém a fibra de curauá proporcionou a convalescência do seu desempenho. Tal fibra contribuiu, principalmente, nas misturas com Brita a 40°C, mostrando um acréscimo médio de 37,9% no MR. No tocante ao agregado de RCD, os compósitos apresentaram maiores MR's em no mínimo 10,5% para a condição de 25°C e 87,4% para 40°C.

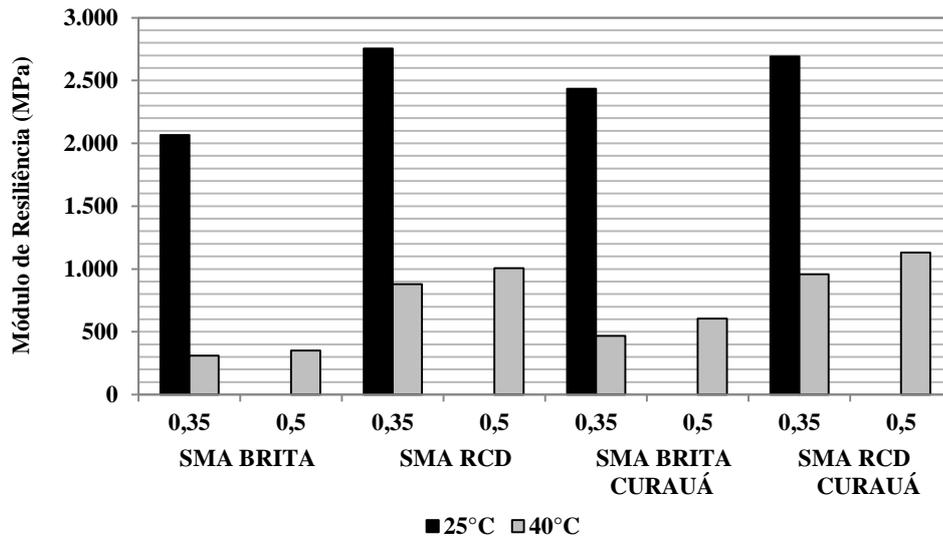


FIGURA 54 - Módulo de Resiliência com aplicação de 15%, em MPa

Na maior tensão aplicada no experimento de Módulo de Resiliência, isto é, 30% da RT (Figura 55), foi verificado desempenho semelhante às condições acima discutidas: a) o MR subtrai na maior temperatura, em no máximo 88,4% no compósito com Brita e 72,6% com RCD, ambos sem fibra; b) o agregado reciclado contribui significativamente para o comportamento elástico da mistura em no mínimo de 11,1% a 25°C e 50,5% a 40°C; e c) a inserção da fibra do curauá favoreceu, por exemplo, 50,6% para mistura com Brita na temperatura de 40°C.

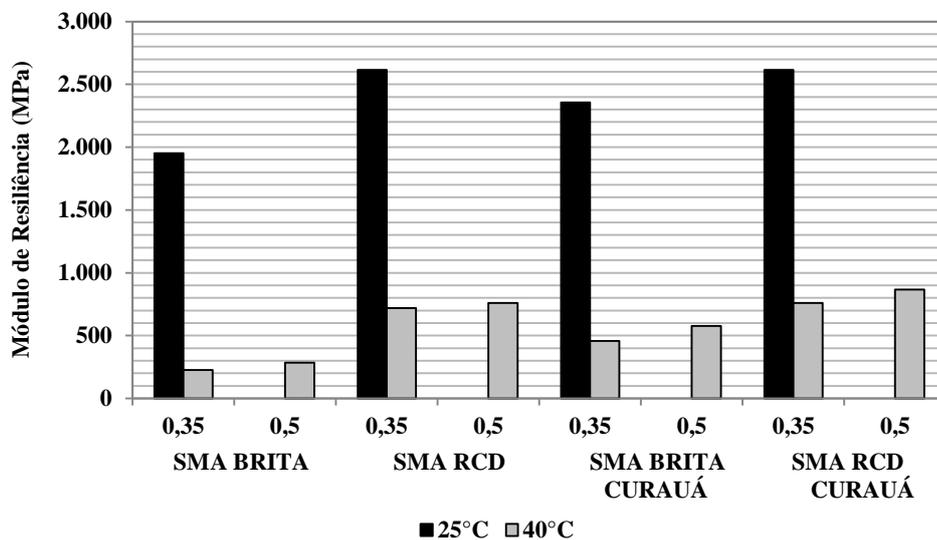


FIGURA 55 - Módulo de Resiliência com aplicação de 30%, em MPa

Em complemento, na condição de temperatura ambiente (25°C) e coeficiente de Poisson de 0,35, como exibido na Figura 56, nota-se claramente a conduta superior no ensaio dos compósitos com agregado reciclado em confronto com o agregado tradicional. Da mesma forma, além da função convencional da fibra de prevenir o escorrimento do mastique asfáltico, foi indicado o beneficiamento das misturas, tanto em comparação ao SMA sem fibra, bem como na estabilidade da resiliência com o acréscimo da tensão aplicada.

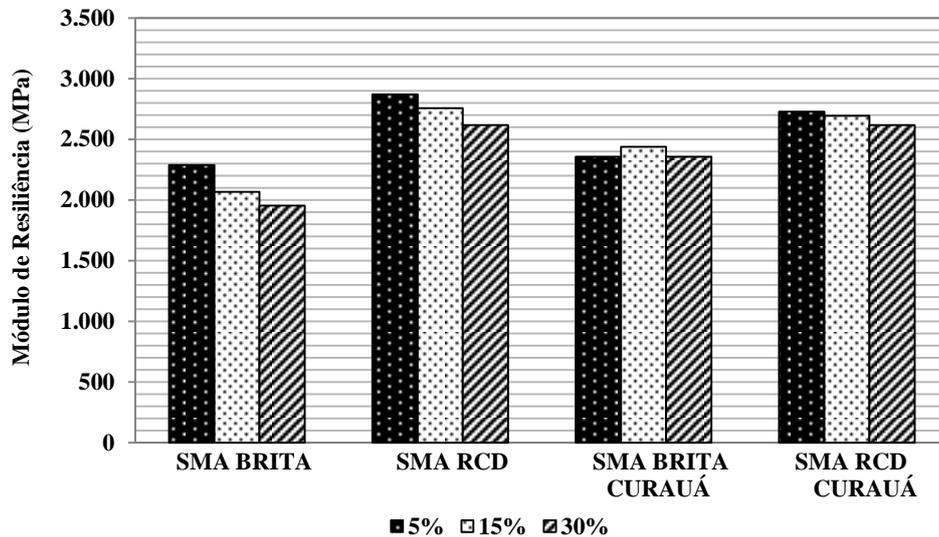


FIGURA 56 - Módulo de Resiliência a 25°C, em MPa

Ao analisar os dados do MR realizados a 40°C (Figura 57), para qualquer coeficiente de Poisson adotado — caso de 0,35 e 0,50, também foi alcançado uma melhor atuação mecânica do SMA com RCD. As incorporações das fibras de curauá auxiliaram na citada condição, ocasionando menores deformações e, portanto maiores MR's para os três percentuais de tensão adotados frente às misturas de controle (ausentes de fibra).

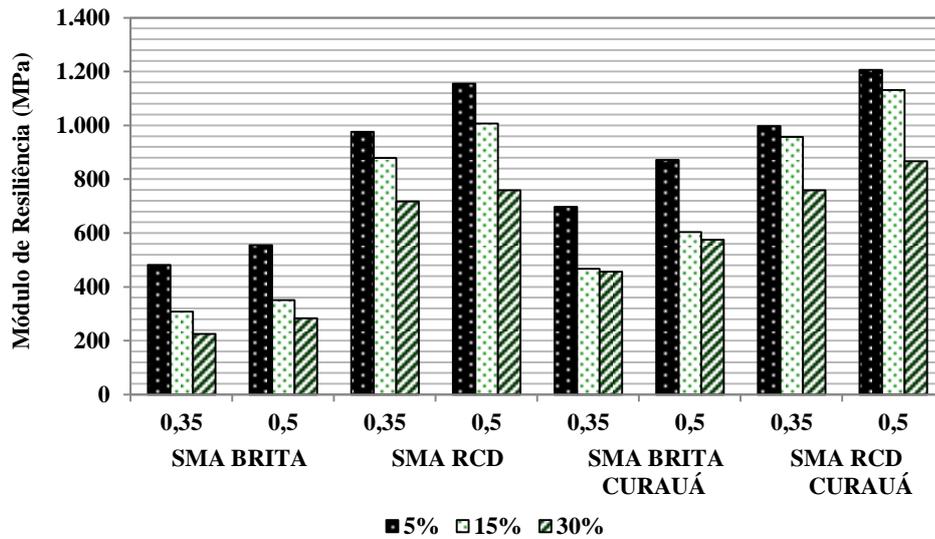


FIGURA 57 - Módulo de Resiliência a 40°C, em MPa

O aumento do MR com a redução da temperatura pode ser concluído com a Figura 58, o qual expõe as perdas no MR a 40°C relativo ao MR obtido a 25°C com coeficiente de poisson de 0,35. Pelo gráfico entende-se que, em geral, o RCD proporciona menor perda da elasticidade do material e da mesma maneira a fibra do curauá favorece a reduzir tais perdas.

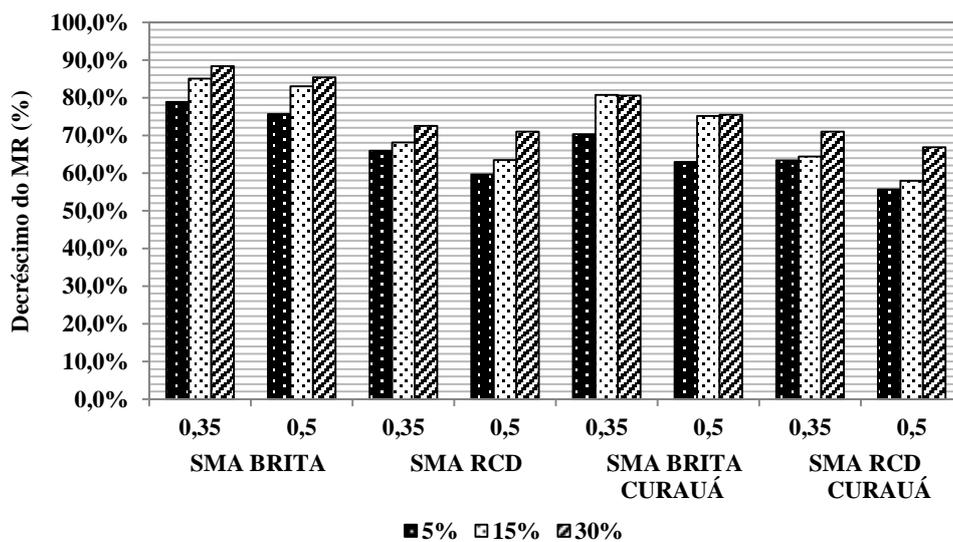


FIGURA 58 - Decréscimo do MR com a temperatura

Nesta mesma perspectiva, HAMZAH & YI (2008) ensaiaram, quanto à resiliência, amostras de misturas densas com agregados de escória e granito associados ao cimento *Portland* e CAP 80/100 nas temperaturas de 10°C, 25°C e 40°C, resultando na redução do MR em até 92% entre 10°C e 40°C e até 80% entre 25°C e 40°C, salientando-se a variação do MR com o percentual de ligante asfáltico.

Essas alterações no MR, segundo o aumento da temperatura, também foram aferidas por KAMAL, SHAZIB & YASIN (2005), onde diminuiu até cerca de 85% com apenas um aumento de 15°C (ou seja, de 25 a 40°C) e até 30% com o acréscimo do ciclo de carregamento de 300ms (150 a 450ms). Congênere, GIGANTE (2007) concluiu que o MR cresce com o decréscimo da temperatura e do teor de asfalto, porém os agregados avaliados em seu trabalho (basalto, gabro e granito) não proporcionaram efeito significativo nos resultados do módulo elástico.

Em complemento ao estudo demonstrado, na Tabela 16 estão exibidos todos os dados adquiridos no ensaio de MR das misturas SMA para evidenciar a redução das deformações resilientes e conseqüentemente aumento do Módulo com a inserção da fibra do curauá, sobretudo nas amostras com Brita. Acerca disto, excetuando-se o SMA com RCD no requisito de 25°C, no qual a adição da fibra ao compósito reduziu sua resiliência. No entanto a 30% da RT, os valores foram os mesmos para sem e com a fibra do curauá.

TABELA 16 - Influência da Fibra nos Compósitos quanto ao MR com coeficiente de Poisson de 0,35

Mistura	Carga (%RT)	25°C	40°C
BRITA → BRITA-CURAUÁ	5%	2,93%	30,95%
	15%	15,15%	33,97%
	30%	17,07%	50,55%
RCD → RCD-CURAUÁ	5%	-5,25%	2,20%
	15%	-2,38%	8,25%
	30%	0,00%	5,40%

5. CONCLUSÕES

A presente dissertação teve como objetivo principal a validação técnica do uso do agregado de Resíduo de Construção e Demolição (RCD) e da fibra do curauá em compósitos asfálticos do tipo Stone Matrix Asphalt – SMA, por meio de ensaios de caracterização física e mecânica dos partícipes e das misturas asfálticas. A mistura de controle foi executada com agregado granítico (Brita). Ressalta-se que a caracterização mecânica da mistura SMA foi realizada por meio dos testes de Resistência a Tração e Módulo de Resiliência. Neste panorama, dá-se sequência as conclusões alcançadas nesta pesquisa.

5.1. Caracterização do Ligante Asfáltico

- a) O ligante asfáltico foi caracterizado como Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP) 50/70;
- b) De acordo com as viscosidades ensaiadas perante a temperatura, tanto pelo ensaio em *Saybolt-Furol* como para o *Brookfield*, inferiram-se as temperaturas de 162,5°C para aquecimento do material asfáltico e 155°C para compactação da mistura;
- c) Atendeu, em geral, as especificações da Agencia Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis.

5.2. Caracterização dos Agregados e Fibra do Curauá

- a) Os agregados graúdos utilizados na pesquisa, Brita 1 e RCD 1, apresentam semelhante granulometria ambos classificados como pedregulho.
- b) As densidades aparentes e densidades aparente na condição saturada com valores distintos para o RCD possivelmente devido a sua porosidade;

- c) Por outro lado, as densidades reais, aparente e aparente na condição saturada com valores aproximados para a Brita;
- d) A absorção e desgaste por abrasão *Los Angeles* indicaram maiores valores para o agregado reciclado;
- e) Adesividade com resultados análogos, igualmente ao índice de forma (forma cúbica), para ambos os materiais pétreos;
- f) A areia residual foi classificada como uma areia média (escala ABNT e ASTM);
- g) O material de enchimento, cimento Portland CP-Z-II-32, atende ao preconizado na norma DNER-EM 367/97; e
- h) A fibra do curauá apresentou densidade de 1.430Kg/m^3 , maior que a fibra de Celulose, portanto podendo gerar compósitos asfálticos mais pesados quanto aos confeccionados com a fibra industrial (celulose).

5.3. Caracterização da Mistura SMA

- a) Foi dosado uma mistura mineral com 75% de graúdo, 15% de miúdo e 10% de fíler para atender as especificações em NAPA (2002) relativo ao teor de CAP;
- b) Na inserção da fibra, a mistura com RCD obteve um pequeno decréscimo nos valores das densidades Densidade Máxima Medida (DMM e Gmm) e Densidade Aparente (Gmb);
- c) Nas misturas com brita, obteve-se menor percentual de CAP para o mesmo V_v (oposto ao RCD, que tem potencial absorvivo);
- d) Para todas as misturas houve o decréscimo do Volume de Vazios com o aumento do ligante betuminoso, sendo o incremento maior do CAP para misturas com Brita e redução deste com a adição das fibras;
- e) Teores de projeto de 6,28%, 6,50%, 6,82% e 6,88%, respectivamente, para as misturas SMA BRITA, SMA BRITA-CURAUÁ, SMA RCD e SMA RCD-CURAUÁ;

- f) Houve o aumento do percentual de ligante com a inserção da fibra, pelo maior superfície específica;
- g) Quanto aos vazios de agregado graúdo (VCA), todas as misturas estudadas satisfizeram a condição do $VCA_{mix} < VCA_{dre}$;
- h) No ensaio de escorrimento da mistura SMA, o aumento da temperatura do CAP promoveu menor escorrimento devido menor tensão superficial seguida da absorção do CAP pelo agregado, logo o agregado granítico suscitou maior escorrimento se comparado com o agregado reciclado;
- i) Na Resistência à Tração, a mudança de 25°C para 40°C inferiu a maior perda da RT para a amostra com Brita;
- j) De 40°C a 60°C, houve o mesmo decréscimo da RT para ambos agregados graúdos;
- k) De 25°C a 60°C, a perda maior foi para brita;
- l) Quanto às fibras, em geral proporciona menor desempenho na RT;
- m) No Módulo de Resiliência com 5% da Resistência à Tração, as misturas com RCD apresentam melhor desempenho elástico em ambas as temperaturas, com destaque para 40°C;
- n) Na aplicação de 15% da RT no ensaio de MR, a fibra de curauá proporcionou a melhora do seu desempenho, mas os agregados de RCD apresentaram maiores MR's;
- o) Para 30% da RT no supracitado ensaio, a menor perda foi para o agregado de RCD, no entanto a fibra do curauá favoreceu a mistura com Brita na temperatura de 40°C;
- p) Na temperatura de 25°C no ensaio de MR, o agregado reciclado obteve melhor desempenho em confronto com o agregado tradicional e as misturas com as fibras apresentaram aumento do MR;
- q) À 40°C, o SMA RCD apresentou melhor resultado de MR; e
- r) As incorporações das fibras de curauá proporcionaram maiores MR's, sobretudo nas amostras com Brita.

5.4. Sugestões para Trabalhos Futuros

Este trabalho contribuiu na análise de um agregado reciclado em misturas do tipo SMA e com inserção de fibra amazônica, esta última habitualmente com excelentes parâmetros mecânicos. Contudo, para a consolidação da viabilidade técnica destes materiais em misturas descontínuas, sugere-se realizar:

- a) O projeto da mistura por meio do Compactador Giratório e metodologias Superpave, utilizando a técnica de compactação por amassamento, similar as condições de campo, e principalmente obtendo uma melhor dispersão das fibras na mistura;
- b) Ensaio de deformação permanente, como importância para tratativa das principais patologias da região, exemplo das trilhas de roda. Paralelamente realizar um modelo do comportamento de tais misturas segundo ensaios de *Creep* Estático;
- c) Tratamento na fibra do curauá para evitar a perda de sua umidade no processo de confecção da mistura e, portanto, melhorando os resultados mecânicos, sobretudo a Resistência à Tração;
- d) Redução do escorrimento da mistura SMA com RCD por meio de outras fibras naturais, bem como polímeros modificadores do ligante, para indicar a relevância econômica do emprego da fibra do curauá;
- e) Implementação de materiais de enchimento proveniente de resíduos, como a cal de carbureto, a fim de avaliar a possível substituição do cimento Portland nas misturas estudadas;
- f) Estudo das possíveis alterações no ligante betuminoso quando misturado à fibra do curauá pelo processo úmido.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AASHTO M92-10. **American Association of State Highway and Transportation Officials M 092-10:** Standard Specification for Wire-Cloth Sieves for Testing Purposes, 2005.

_____ M325-08. **American Association of State Highway and Transportation Officials M325-08:** Standard Specification for Stone Matrix Asphalt (SMA), 2008

_____ MP8-02. **American Association of State Highway and Transportation Officials MP 8-02:** Stone Matrix Asphalt (SMA), 2001.

_____ T19. **American Association of State Highway and Transportation Officials T 19:** Standard Method of Test for Bulk Density ("Unit Weight") and Voids in Aggregate, 2009.

_____ T-305. **American Association of State Highway and Transportation Officials T-305:** Determination of Draindown Characteristics in Uncompacted Asphalt Mixtures, 2009.

_____ TP-31-96. **Standart Test Method for Determining the Resilient Modulus of Bituminous Mixtures by Indirect Tension.** American Association of State Highway and Transportation Officials, Estados Unidos, 2000.

ABNT NBR 7809:2008. **Agregado Graúdo:** Determinação do índice de Forma pelo Método do Paquímetro - Método de Ensaio. Rio de Janeiro, 2008.

_____ 11582:1991. **Cimento Portland:** Determinação da expansibilidade de *Le Chatelier* - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1991.

ABRELPE. Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil, 2009.**

Disponível em: <http://www.abrelpe.org.br/Panorama/panorama2009.pdf>

Acesso em: 12 mai. 2012.

ABTAHI, S. M; SHEIKHZADEH, M; HEJAZI, S. M. **Fiber-reinforced asphalt-concrete – A review.** Construction and Building Materials, v. 24, p. 871–877, 2010.

AHMADINIA, E; ZARGAR, M; KARIM, M. R; ABDELAZIZ, M; SHAFIGH, PAYAM. **Using waste plastic bottles as additive for stone mastic asphalt.** In: Materials and Design. v. 32, p. 4844–4849, 2011.

AHMADINIA, E; ZARGAR, M; KARIM, M. R; ABDELAZIZ, M; AHMADINIA, E. **Performance evaluation of utilization of waste Polyethylene Terephthalate (PET) in stone mastic asphalt.** Construction and Building Materials, v. 36, p. 984–989, 2012.

ANP. Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. **Resolução No. 19, de 11 de julho de 2005.** ANP, Rio de Janeiro, 2005.

ALBUQUERQUE, Fernando Silva. **Qualidade em Empresas de Projeto e Supervisão de Obras Rodoviárias com Pavimento Asfáltico.** 2004. Dissertação (Mestrado) - Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Campina Grande. Campina

Grande: UFCG, 2004.

ALMEIDA, Paulo Roberto de. **A Experiência Brasileira em Planejamento Econômico: Uma Síntese Histórica**. Brasília, 2004.

Disponível em: <http://www.pralmeida.net/05DocsPRA/1277HistorPlanejBrasil.pdf>
Acesso em: 02 mar. 2011.

ARAÚJO, J. R; MANO, B; TEIXEIRA, G. M; SPINACÉ, M. A. S; PAOLI, M.-A D. **Biomicrofibrilar composites of high density polyethylene reinforced with curauá fibers : Mechanical , interfacial and morphological properties**. Composites Science and Technology. v. 70. n. 11. 2010.

ARAÚJO, J; MANO, B; DE PAOLI, M. A; MARTÍNEZ, A. B. **Fractura y Morfología de Compuestos de Polipropileno Reforzados con Fibra de Curauá**. Anales de Mecánica de la Fractura, 26, v. 1, p. 181-186, 2009.

ASI, Ibrahim M. **Laboratory Comparison Study for the Use of Stone Matrix Asphalt in Hot Weather Climates**. Construction and Building Materials, 20. p. 982–989. 2006.

ASTM C127. **Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Coarse Aggregate**. American Society for Testing and Materials, 2012.

_____C136. **Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates**. American Society for Testing and Materials, 2006.

_____C29. **Standard Test Method for Bulk Density (Unit Weight) and Voids in Aggregate**. American Society for Testing and Materials, 2009.

_____D4123-82. **Standard Test Method for Indirect Tension Test for Resilient Modulus of Bituminous Mixtures**. American Society for Testing and Materials, 1995.

BABADOPULOS, L. F. A. L; VALE, A. C; SOARES, J. B; CASAGRANDE, M. D. T. Estudo Laboratorial da Viabilidade do Uso de Fibras Sintéticas em Misturas do Tipo SMA. In: **Anais...** Reunião de Pavimentação Urbana, 15. Salvador: ABPv, 2008.

BALBO, José Tadeu. **Pavimentação asfáltica: materiais, projeto e restauração**. 558 p. Oficina de Textos, 2007.

BARDINI, V. S. S; KLINSKY, L. M. G; FERNANDES JÚNIOR, J. L. **A importância do Filer para o Bom Desempenho de Misturas Asfálticas**. Revista Minerva. v. 7(1). p. 71-78. 2010.

BATISTA, Fernando Gomes da Silva. **Caracterização Física e Mecânica dos Agregados de Argila Calcinada Produzidos com Solos Finos da BR-163/PA**. 2004. Dissertação (mestrado) – Engenharia de Transportes, Instituto Militar de Engenharia. Rio de Janeiro: Instituto Militar de Engenharia, 2004.

BENTO, Priscila Fiochi. **Uso de Cal e Fibras na Melhoria de Materiais para Utilização em Estrutura de Pavimentos**. 2006. 2006. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília. Brasília: UNB, 2006.

BERALDO, A. L; VIEIRA, F. de F. Argamassa com Adição de Fibras de Sisal. In: **Simposio Brasileiro de Tecnologia de Argamassas**, 5. São Paulo: Página & Letras,

2003. v.1. p. 449-454. 2003.

BERNUCCI, L. B; MOTTA, L. M. G; CERATTI, J. A. P; Soares, J.B. **Pavimentação Asfáltica: Formação Básica para Engenheiros**, Petrobras-Asfaltos, Rio de Janeiro, 2008.

BERTOLDO, R. A; SOUZA, R. J. Q; CUNHA, T. M. F; FROTA, C. A. Estudo da Influência do Polímero SBS na Resistência à Tração de Misturas Asfálticas utilizando Areia de Resíduos Sólidos de Construção e Demolição - RCD e Areia Tradicional para o Município de Manaus. In: **Anais...** Congresso de Infraestrutura de Transportes, 4. São Paulo: ANDIT, 2010.

BESSA, I. S; CASTELO BRANCO, V. T. F; SOARES, J. B.. A influência do método de compactação e da natureza dos agregados na estrutura interna de misturas asfálticas. In: **Anais...** Congresso de Ensino e Pesquisa em Transportes - ANPET, 24. Salvador: ANPET, 2010.

BINDU C. S; BEENA, K. S. **Waste plastic as a stabilizing additive in Stone Mastic Asphalt**. International Journal of Engineering and Technology. v.2 (6), p. 379-387, 2010.

BRITO, Lélío Antônio Teixeira; GRAEFF, Ângela Gaio. **Avaliação da Metodologia de Cálculo para determinação do Módulo de Resiliência por Compressão Diametral para fins de Projeto de Pavimento e Controle de Qualidade de Obras**. Relatório Final de Pesquisa - Concessionária da Rodovia Osório-Porto Alegre – CONCEPA, 2008.

BRITO, Lélío Antônio Teixeira. **Avaliação e Análise Paramétrica do Ensaio de Compressão Diametral sob Cargas Repetidas em Misturas Asfálticas**. 2006. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre: UFRGS, 2006.

BROWN, E. R; MALLICK, R. B; HADDOCK, J. E; BUKOWSKI, J. **Performance of Stone Matrix Asphalt (SMA) Mixtures in the United States**. NCAT Report n. 97-1, 1997.

CABRAL, Gustavo da Luz Lima. **Metodologia de Produção e Emprego de Agregados de Argila Calcinada para Pavimentação**. 2005. Dissertação (mestrado) – Engenharia de Transportes, Instituto Militar de Engenharia. Rio de Janeiro: Instituto Militar de Engenharia, 2005.

CALLISTER JÚNIOR, W. D. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução**. Rio de Janeiro: LTC, 2002.

CARRIJO, O. A; LIZ, R. S; MAKISHIMA, N. **Fibra da Casca do Coco Verde como Substrato Agrícola**. Revista Horticultura Brasileira. v. 20. n. 4. p. 533-535. Brasília: 2002.

CAVALCANTE, D. G; CRISÓSTOMO, P. H. S; SILVA, L. C. P; SOUZA, R. J. Q; GUIMARÃES, D. M. D; FROTA, C. A. **Levantamento Visual das Patologias na Cidade de Manaus-AM**. Revista Teoria e Prática na Engenharia Civil. n.19. p.77-87. Maio, 2012.

CAVALCANTE, D. G; SOUZA, R. J. Q; CUNHA, T. M. F; FROTA, C. A. Estudo da Resistência à Tração de Misturas Asfálticas utilizando Ligante Modificado com SBS e Agregados Sinterizados de Argila Calcinada para a Construção das Vias Urbanas de Manaus-AM. In: **Anais...** Congresso de Infraestrutura de Transportes, 4. São Paulo:

ANDIT, 2010.

CAVALCANTE, D. G; SILVA, C. L; VALENÇA, P. M. A; SOUZA, R. J. Q; FROTA, C. A. Comportamento de Misturas Asfálticas Confeccionadas com Agregados Sinterizados de Argila Calcinada para a Construção de Pavimentos na Amazônia. In: **Anais...** Congresso de Infraestrutura de Transportes, 5. São Paulo: ANDIT, 2011^a.

CAVALCANTE, D. G; SOUZA, R. J. Q; CUNHA, T. M. F; GUIMARÃES, D.M.D; FROTA, C. A. Composição de Misturas Asfálticas com Ligante Modificado por Polímeros (SBS e EVA) e Agregados Sinterizados de Argila Calcinada (ASAC) para Manaus-AM. In: **Anais...** Reunião de Pavimentação Urbana, 17. Porto Alegre: ABPv, 2011^b.

CAVALCANTE, D. G; SOUZA, R. J. Q; FERREIRA, M. R. P; FROTA, C. A; FORTES, R. M. Avaliação de Misturas Asfálticas por meio do Módulo de Resiliência confeccionadas com Agregados Sinterizados de Argila Calcinada e Ligante Modificado com SBS para as Vias Urbanas de Manaus-AM. In: **Anais...** Congresso Ibero-Latinoamericano do Asfalto, 16. Rio de Janeiro: IBP, 2011^c.

CBIC. Câmara Brasileira da Indústria da Construção. **Pesquisa Anual da Indústria da Construção**. v. 19. p.1-98. Rio de Janeiro: IBGE, 2009.

CHIU, Chui-Te. LU, Li-Cheng. **A laboratory Study on Stone Matrix Asphalt Using Ground Tire Rubber**. Science Direct Journal of Construction and Building Materials. V. 21. p. 1027-1033. 2007.

CNT. Confederação Nacional de Transportes. **Pesquisa CNT de Rodovias: Relatório Gerencial**. Brasília: CNT, 2011.

CORDEIRO, Iracema Maria Castro Coimbra; SILVA, Ismael Matos da. Avaliação Econômico-Financeira da Cultura de Curauá (Ananas Comosus.var. erectifolius(L.B.Smith) Coppus & Leal: Um estudo de caso no município de Santo Antônio do Tauá, PA. In: **Anais...** Congresso da Sociedade Brasileira de Economia, Administração e Sociologia, 48. Ruralão, 2008. p. 1-14. 2008.

CORRÊA, A. C; TEIXEIRA, E. M; PESSAN, L. A; MATTOSO, L. H. C. **Cellulose nanofibers from curaua fibers**. Cellulose (London), v. 17, p. 1183-1192, 2010.

CPRM. Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais. **Recursos Minerais: Programa de Integração Mineral em Municípios da Amazônia**. CPRM, 1998.

CUNHA, T. M. F. da; GUIMARÃES, D. M. D; FROTA, C. A. **Estudo do Ligante CAP 50/70 Modificado pelo Polímero Eva para Vias Urbanas de Manaus/AM**. Revista Petro & Química. v. 322. p. 47-51. 2010.

CUNHA, T. M. F; CRISOSTOMO, P. H. S; FROTA, C. A. Caracterização Reológica de Ligantes Asfálticos (CAP 50/70) Puros e Modificados com Polímero SBS. In: **Anais...** Reunião de Pavimentação Urbana, 17. Porto Alegre: ABPv, 2011.

CUNHA, Tayana Mara Freitas da. **Estudo do Comportamento Físico, Químico e Reológico de Ligante Asfáltico modificado com Polímero e Materiais advindos de Plantas Amazônicas para Aplicação em Revestimento Asfáltico**. 2010. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos da Amazônia,

Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2010.

DNER-EM 367/97 - **Material de enchimento para misturas betuminosas**. Rio de Janeiro, 1997.

DNER-ME 035/98. **Agregados**: Determinação da Abrasão “*Los Angeles*”. 1998.

_____ 043/95. Misturas Betuminosas a quente – ensaio Marshall. 1995.

_____ 079/94. **Agregado**: Adesividade a Ligante Betuminoso. 1994.

_____ 081/98. **Agregados**: Determinação da Absorção e da Densidade de Agregado Graúdo. 1998.

_____ 083/98. **Agregados**: Análise Granulométrica. 1998.

_____ 084/95. **Agregado miúdo**: Determinação de Densidade Real. 1995.

_____ 085/94. **Material Finamente Pulverizado**: Determinação da Massa Específica Real. 1994.

_____ 194/98. **Agregados**: Determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco Chapman. Rio de Janeiro, 1998.

DNIT 136/2010-ME. **Pavimentação asfáltica**: Misturas asfálticas – Determinação da resistência à tração por compressão diametral. 2010.

ERENO, Dinorah. **Fibra para Toda Obra**. Boletim Eletrônico Fapesp. n. 104. 2004. Disponível em: <<http://revistapesquisa.fapesp.br/?art=2598&bd=1&pg=1&lg=>>>. Acesso em: 24 abr. 2011.

FERREIRA, M. R. P; SOUZA, R. J. Q; CAVALCANTE, D. G; BERTOLDO, R. A; SILVA, C. L; FROTA, C. A. Misturas Asfálticas Alternativas para Manaus – AM. In: **Anais...** Congresso Ibero-Latinoamericano do Asfalto, 16. Rio de Janeiro: IBP, 2011^a.

FERREIRA, M. R. P; CARTAXO, E. F; CRISOSTOMO, P. H. S; VALENÇA, P. M. A; FROTA, C. A. Misturas com Emulsão Asfáltica e Agregado Alternativo. In: **Anais...** Reunião de Pavimentação Urbana, 17. Porto Alegre: ABPv, 2011^b.

FRAXE, T. J. P; PEREIRA, H. S; WITKOSKI, A. C. **Comunidades Ribeirinhas Amazônicas Modos de Vida e Uso dos Recursos Naturais**. Manaus: EDUA, 2007.

FROTA, C. A; NUNES, F. R. G; SANTOS, M. G. R; CANTANHEDE, B. P. Utilização de Agregados de Resíduos da Construção Civil como Substituto do Agregado Natural para Estabilização do Solo Argiloso Superficial de Manaus. In: **Anais...** Congresso Brasileiro de Geotcnia Ambiental, 5. Porto Alegre, 2003.

FROTA, C. A; SILVA, C. L; NUNES, F. R. G. Análise do Comportamento Mecânico de Misturas Asfálticas Confeccionadas com Agregados Sintéticos de Argila Calcificada. In: **Anais...** Jornadas Luso-Brasileiras de Pavimentos: Políticas e Tecnologias, 5. v. 047. Recife, 2006^a.

FROTA, C. A; MELO, D. M; NUNES, F. R. G. Análise do Comportamento Mecânico de Misturas Asfálticas com Resíduo Processado da Construção Civil. In: **Anais...** Jornadas

Luso-Brasileiras de Pavimentos: Políticas e Tecnologias, 5. Recife, 2006^b.

FROTA, C. A; MELO, D. M; SILVA, C. L; NUNES, F. R. G; Santos, M. G. R. Alternativa ao uso do Seixo Rolado, como Agregado Graúdo em Misturas Asfálticas, para o Município de Manaus. In: **Anais...** Congresso de Infra-Estrutura de Transportes, 1. São Paulo: ANDIT, 2007^a.

FROTA, C. A; MELO, D. M; SILVA, C. L; NUNES, F. R. G. Avaliação do Atrito em Misturas Asfálticas Utilizando Resíduos de Construções e Demolições em Manaus-AM. In: **Anais...** Jornadas Luso-Brasileiras de Pavimentos, 6. Porto: FEUP, 2007^b.

FROTA, C. A; MELO, D. M; D'ANTONA, D. M. Influência da Temperatura nas Misturas Asfálticas com Resíduos de Construção e Demolição. In: **Anais...** Jornadas Luso-Brasileiras de Pavimentos, 6. Porto: FEUP, 2007^c.

FROTA, C. A; NUNES, F. R. G; SILVA, C. L; MELO, D. M; SANTOS, M. G. R. **Desempenho Mecânico de Misturas Asfálticas confeccionadas com Agregados Sintéticos de Argila Calcinada.** Revista Cerâmica. n. 53. p. 255-262. 2007^d.

FROTA, C. A; MELO, D. M; SILVA, C. L; SANTOS, M. G. R. Avaliação da Substituição do Seixo Rolado por Agregados Alternativos em Misturas Asfálticas para Manaus. In: **Anais...** Jornadas Luso-Brasileiras de Pavimentos, 6. Porto: FEUP, 2007^e.

GIGANTE, Antonio Carlos. **Avaliação da Suscetibilidade Térmica e do Efeito das Condições Ambientais no Enrijecimento de Misturas Asfálticas densas à luz de seus comportamentos resilientes.** 2007. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes e Área de Concentração em Infra-estrutura de Transportes, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, 2007.

GONÇALVES, F. P; SILVEIRA, J; NUÑEZ, W. P; BICA, A. V. D; CERATTI, J. A. P. Avaliação de Medidas de Deformação Vertical no Subleito de uma Estrutura de Pavimento Flexível. In: **Anais...** Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica. v. 1. p. 609-614. São Paulo: ABMS, 1998.

GRUBBA, David Christian Regis Pereira. **Estudo do Comportamento Mecânico de um Agregado Reciclado de Concreto para Utilização na Construção Rodoviária.** 2009. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes e Área de Concentração em Infra-estrutura de Transportes, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, 2009.

GUIMARÃES, Daniela Muniz D'Antona. **Estudo de Misturas Asfálticas com Ligante Modificado por Polímero EVA e Resíduo da Construção Civil para as vias Urbanas de Manaus.** 2009. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Amazonas. Manaus, 2009.

HABLITZEL, M. P; GARCIA, D. E; HOTZA, D. Interfaces fracas em compósitos de matriz cerâmica de alumina/alumina. **Matéria (Rio de Janeiro)**, Rio de Janeiro, v. 16, n. 3, 2011.

HAMZAH, MEOR O. YI, TEOH C. **Effects of Temperature on Resilient Modulus of Dense Asphalt Mixtures Incorporating Steel Slag Subjected to Short Term Oven Ageing.** Proceedings of World Academy of Science, Engineering and Technology. v. 36. 2008.

HOMEM, Tiago Rosa. **Comportamento de Misturas Asfálticas Porosas com Ligantes modificados por Ppolímeros e Adição de Fibras**. 2002. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2002.

HUANG, Y; BIRD, R. N; HEIDRICH, O. **A review of the use of recycled solid waste materials in asphalt pavements**. Conservation and Recycling, 52, p. 58–73. 2007.

HU, H; SHI, X; ZHANG, M. **The Influence of Granite Microstructure on the Properties of Pavement Material**. In: International Conference on Electric Technology and Civil Engineering (ICETCE). p. 6311 – 6314. 2011.

INSTITUTO DO ASFALTO. **Manual do asfalto**. Brasil: 2002.

JIMÉNEZ, Alexandra María Gómez. **Estudo Experimental de um Resíduo de Construção e Demolição (RCD) para utilização em Pavimentação**. 2011. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, 2011.

JOHN, Liana. **Curauá enfrenta até Terremoto!, 2012^a**.

Disponível em: <http://planetasustentavel.abril.com.br/blog/biodiversa/curaua-enfrenta-ate-terremoto/>

Acesso em: 17 nov. 2012.

JOHN, Liana. **O toque de Midas da bromelina, 2012^b**.

Disponível em: <http://planetasustentavel.abril.com.br/blog/biodiversa/o-toque-de-midas-da-bromelina/>

Acesso em: 17 nov. 2012.

KAMAL, M. A. SHAZIB, Faisal. SHAZIB, Faisal. **Resilient Behaviour of Asphalt Concrete under Repeated Loading & Effects of Temperature**. Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies. v. 6. p. 1329-1343. 2005.

KARAKUS, Askeri. **Investigating on possible use of Diyarbakir basalt waste in Stone Mastic Asphalt**. Construction and Building Materials, v. 25, p. 3502–3507, 2011.

LEITE, Leni Figueiredo Mathias. **Estudos de Preparo e Caracterização de Asfaltos Modificados por Polímero**. Tese (Doutorado em Ciência e Tecnologia de Polímeros) – Instituto de Macromoléculas Professora Eloisa Mano, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1999.

LOBATO, Paulo Henrique. **Estrada União e Indústria, Primeira Rodovia Pavimentada do Brasil completa 150 Anos**. Jornal do Estado de Minas. Minas Gerais, 17 de jan. 2011.

MACHADO, C. C; LIMA, D. C. DE; ALMEIDA, R. M. de. **Estudo do Comportamento da Mistura Solo-Cimento Reforçado com Fibra Sintética para Uso em Estradas Florestais**. Revista CERNE, Lavras, v.4, n.1, p. 123-128, 1998.

MARINELLI, A. L; MONTEIRO, M. R; KOBAYASHI, M; AMBROSIO, J. D; BRANCIFORTI, M. C; NOBRE, A. D. **Desenvolvimento de Compositos Polimericos com Fibras Vegetais Naturais da Biodiversidade: uma Contribuicao para a Sustentabilidade Amazonica**. Revista Polímeros. v. 18. p. 92-99. 2008.

MARTINS NETO, Sandoval Ferreira. **Material Compósito de Matriz Frágil reforçado com Fibras Naturais de Sisal e Malva: Caracterização e Correlações das Propriedades e Mecânicas.** 2011. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Instituto de Tecnologia, Universidade Federal do Pará, Belém, 2011.

MEIRELLES FILHO, João. **O livro de ouro da Amazônia.** 5ª Edição. Rio de Janeiro: Ediouro, 2006.

MELO, Diego Meneses de. **Estudo do Resíduo de Construções e Demolições oriundo do Município de Manaus-AM em Misturas Asfálticas.** 2009. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2009.

MELO, D. M; SILVA, C. L; SANTOS, M. G. R; FROTA, C. A. Efeito da Absorção nos Índices Físicos de Misturas Asfálticas. In: **Anais... Jornadas Luso-Brasileira de Pavimentos**, 7. São Paulo: ANDIT, 2008.

MOKHTARI, Ali. NEJAD, Fereidoon Moghadas. **Mechanistic approach for fiber and polymer modified SMA mixtures.** Construction and Building Materials, v. 36. p. 381-390. 2012.

MONTANARI, Rodrigo Marques. **Estudo do Comportamento Mecânico de Misturas Betuminosas a Frio e a Quente para fins de Pavimentação de Vias.** 2007. 2007. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa, Minas Gerais, 2007.

MONTEIRO, Luiz Henrique Alves. **Sistemas Dinâmicos.** 2ª Edição. 625 p. São Paulo: Editora Livraria da Física, 2006.

MOTTA, Rosângela dos Santos. **Estudo Laboratorial de Agregado Reciclado de Resíduo Sólido da Construção Civil para Aplicação em Pavimentação de Baixo Volume de Tráfego.** 2005. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

MOURÃO, Fabricio Augusto Lago. **Misturas Asfálticas de Alto Desempenho Tipo SMA.** 2003. Tese (Mestrado) – Programas de Pós-Graduação de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2003.

NAPA. National Asphalt Pavement Association. **Designing and Constructing SMA Mixtures – State of the Practice.** Quality Improvement Series 122. EUA, 2002.

NASCIMENTO, Ricardo Ribeiro. **Utilização de Agregados de Argila Calcinada em Pavimentação; Uma Alternativa para o Estado do Acre.** 2005. Tese (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro: UFRJ, 2005.

NEVES FILHO, C. L. D; BERNUCCI, L. B; FERNANDES JUNIOR, J. L. **Avaliação de misturas asfálticas SMA produzidas com ligante asfalto-borracha quanto ao módulo de resiliência, a resistência à tração e fadiga.** In: 17o. Encontro de Asfalto. v. 1. p. 128-136. Rio de Janeiro, 2004.

NUNES, F. R. G; SILVA, C. L; FROTA, C. A. **Identificação do Dano Induzido por Fadiga e Cura de Micro Trincas em Compósitos Cerâmicos Particulados, Voltados à Aplicação em Pavimentos Flexíveis.** Revista Cerâmica (São Paulo. Impresso). v. 55. p.

425-436. 2009^a.

Obtenção do Módulo Dinâmico de Misturas Asfálticas com Agregados Sintéticos de Argila Calcinada, Utilizando o Ensaio de Compressão Diametral. Revista Transportes. v. 17. p. 5-13. 2009^b.

NUNES, Fábio Roberto Garcia. **Caracterização Mecânica de Misturas Asfálticas Confeccionadas com Agregados Sintéticos de Argila Calcinada quanto a Deformação Permanente.** 2006. Dissertação (Mestrado) - Programa de Mestrado em Engenharia de Transportes, Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará. Fortaleza: UFC, 2006.

ODA, Sandra. **Análise da Viabilidade Técnica da Utilização do Ligante Asfalto-Borracha em Obras de Pavimentação.** Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo. São Carlos, 2000.

ODA, S; EDEL, G; FERNANDES JÚNIOR, J. L. **Primeiro trecho experimental urbano de SMA com asfalto-borracha sem fibras: projeto, construção e avaliação.** Revista Minerva, São Carlos, SP, v. 2, n. 2, p. 203-216, 2006.

ODA, S; FERNANDES JÚNIOR, J. L; ILDEFONSO, J. S. **Analysis of use of natural fibers and asphalt rubber binder in discontinuous asphalt mixtures.** Construction & Building Materials, v. 26/1, p. 13-20, 2012.

OLIVEIRA, B. C; BERTOLDO, R. A; SOUZA, R. J. Q; GUIMARÃES, D. M. D; FROTA, C. A. Utilização de resíduos de construção (RCD) e ligante modificado com SBS em misturas asfálticas para a cidade de Manaus-Am. In: **Anais...** Reunião Anual de Pavimentação, 40. Rio de Janeiro: ABPV, 2010.

OLIVEIRA FILHO, Clonilo Moreira Sindeaux de. **Estudo do Efeito de Diferentes Granulometrias no Comportamento Mecânico de Misturas Asfálticas Densas Descontínuas tipo Stone Matrix Asphalt (SMA).** 2007. Dissertação (Mestrado) – Programa de Mestrado em Engenharia de Transportes, Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2007.

ONOFRE, F. C; LOPES, M. M; ARAUJO JUNIOR, P. C; VALE A. C; OLIVEIRA FILHO, C. M. S; SOARES, J. B. Comportamento Mecânico de Misturas Asfálticas do tipo SMA, Concreto Asfáltico e Areia-Asfalto. In: **Anais...** Congresso Nacional de Pesquisa e Ensino em Transportes (ANPET), 22. Fortaleza, 2008.

ONOFRE, F. C; BESSA, I.S; CASTELO BRANCO, V. T. F; SOARES, J. B. **Correlação entre Variáveis de Densificação do Compactador Giratório e Resistência à Deformação Permanente de Misturas Asfálticas convencionais e com Resíduo.** Revista Transportes. v.19 n.1. p. 13–22. 2011.

PASSOS, Paulo Roberto de Assis. **Destinação Sustentável de Cascas de Coco (Cocos Nucifera) Verde: Obtenção de Telhas e Chapas de Partículas.** Dissertação (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.

PEREIRA, L. A. G; LESSA, S. N. **O Processo de Planejamento e Desenvolvimento do Transporte Rodoviário no Brasil.** Revista Caminhos de Geografia (UFU). v. 12. p. 26-46. 2011.

PEREIRA, F. D; PINTO, J. E. B. P; ROSADO, L. D. S; CASTRO, D. M. DE; RODRIGUES, H. C. DE A; BEIJO, L. A; LAMEIRA, O. A. **Caracteres Anatômicos de Fibras Foliaves de Brotações de Curauá Propagadas in Vitro**. Acta Scientiarum Biological Sciences, Maringá, v.29, n.1, p.23-28, 2007.

PERES, Maria das Neves Pontes Barata. **Compósito de Argamassa de Cimento Reforçada por Fibra de Sisal com Entalhe Definidos: Caracterização Mecânica e Mecanismo de Falha**. 2011. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação Strictu Sensu em Engenharia Mecânica, Instituto de Tecnologia, Universidade Federal do Pará, Belém, 2011.

PINTO, Isaac Eduardo. **Estudo das características físicas e mecânicas de misturas recicladas com espuma de asfalto**. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Transportes. São Paulo, 2002.

PIZA, A. A. P; FACHÍN-TÉLAN, A. **O Homem Amazônico e sua Percepção sobre a Conservação dos Recursos Naturais**. Revista Areté - Revista Amazônica de Ensino de Ciências. p. 111 - 127. Outubro, 2009.

PROWELL, B. D; WATSON, D. E; HURLEY, G. C; BROWN, E. R. **Evaluation of Stone Matrix Asphalt (SMA) for Airfield Pavements**. NCAT Final Report, 2009.

PUTMAN, B.J. AMIRKHANIAN, S.N. **Utilization of Waste Fibers in Stone Matrix Asphalt Mixtures**. Journal of Resources - Conservation, and Recycling. v. 24. Issue 3. 2004.

RAMALHO, Elcio. A Folha Amazônica que virou Arte. 2005.
Disponível em: <http://www.rfi.fr/actubr/articles/068/article_124.asp>.
Acesso em: 24 abr. 2011.

REIS, R. M. M. de; BERNUCCI, L. L. B; ZANON, A. L. Revestimento asfáltico tipo SMA para alto desempenho em vias de tráfego pesado. In: **Anais...** Associação Nacional de Pesquisa e Ensino em Transportes, 15. Rio de Janeiro: ANPET, 2001. v. 1. p. 291-298.

SANTOS, Maria das Graças Rufino dos. **Estudo do Comportamento de Agregado Sintético de Argila Calcinada para Uso em Revestimentos Asfálticos para Manaus**. 2007. Dissertação (Mestrado) – Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil. Brasília UNB, 2007.

SARGES, R. R; NOGUEIRA, A. C. R; FROTA, C. A; SILVA, C. L. da; **Depósitos argilosos Cenozóicos do Estado do Amazonas: Utilização como Agregados de Argilas Calcinadas para Pavimentações na Região Amazônica**. Brazilian Geographical Journal: Geosciences and Humanities research médium. 16 Out. 2010. p. 33-49.

SENÇO, Wlastermiller de. **Manual de técnicas de pavimentação**. São Paulo: Pini, 2008.

SHAH, Shahreena Melati Rhasbudin. ABDULLAH, Mohd Ezree. **Effect of Aggregate Shape on Skid Resistance of Compacted Hot Mix Asphalt (HMA)**. In: International Conference on Computer and Network Technology, 2. 2010.

SILVA, Patricia Barboza da. **Estudo em Laboratório e em Campo de Misturas Asfálticas SMA 0/8S**. 2005. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da

Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia de Transportes, São Paulo, 2005.

SILVA, Thayse Alves de Lima e. **Estudo da estabilidade da enzima bromelina extraída do Curauá (*Ananas Erectifolius* L.Smith)**. Tese (Doutorado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Química. Campinas, 2012.

SILVA, C. L.; NUNES, F. R. G; FROTA, C. A. Obtenção do Módulo Dinâmico de Misturas Asfálticas com Agregados Sintéticos de Argila Calcinada (ASAC). In: **Anais...** Reunião de Pavimentação Urbana, 15. Rio de Janeiro: ABPv, 2008^a.

SILVA, C. L; MELO, D. M; SANTOS, M. G. R; FROTA, C. A. Evolução do Processo Produtivo na Obtenção de Agregados Sintéticos de Argila Calcinada para a Região Amazônica. In: **Anais...** Jornadas Luso-Brasileiras de Pavimentos, 7. São Paulo: ANDIT, 2008^b.

SILVA, H. S. P.; ABREU, T. M; MORAES, A. G. O; TOMIYAMA, M; COELHO, L. A. F; AMICO, S. C. Utilização de ensaios short beam em compósitos com fibras de sisal e curauá. In: Congresso Brasileiro de Polímeros - CBPol, 10. Foz do Iguaçu. v. 1. p. 1-10. 2009.

SILVA, L. C. P; SOUZA, R. J. Q; CUNHA, T. M. F; FROTA, C. A. Avaliação da Resistência à Tração de Misturas Asfálticas utilizando Agregado Regional e Ligante modificado com SBS para Manaus-AM. In: **Anais...** Congresso de Infraestrutura de Transportes, 4. São Paulo: ANDIT, 2010.

SILVA, L. C. P; BERTOLDO, R. A; SOUZA, R. J. Q; SILVA, O. C; FROTA, C. A. Avaliação da Deformação Permanente em Misturas Asfálticas para o Município de Manaus Am.. In: **Anais...** Congresso de Infraestrutura de Transportes, 5. São Paulo: ANDIT, 2011^a.

SILVA, L. C. P; SOUZA, R. J. Q; VALENÇA, P. M. A; FROTA, C. A. Estudo Mecânico por Meio do Módulo de Resiliência de Misturas Asfálticas Confeccionadas com Seixo, Brita e Ligante Modificado com SBS aplicados a Pavimentação das Vias Urbanas de Manaus. In: **Anais...** Congresso Ibero-Latinoamericano do Asfalto, 16. Rio de Janeiro: IBP, 2011^b.

SILVA, L. C. P; SOUZA, R. J. Q; GUIMARÃES, D. M. D; CUNHA, T. M. F; FROTA, C. A. Estudo do Comportamento Mecânico por Meio do Módulo de Resiliência de Misturas Ásfálticas Modificadas com Polímero SBS e EVA para Manaus-AM. In: **Anais...** Reunião de Pavimentação Urbana, 17. Porto Alegre: ABPv, 2011^c.

SOUZA, João Batista de Queiroz. **Comportamento de Misturas Asfálticas a Quente com Agregados Provenientes de Jazidas de Seixo no Estado do Pará**. 2007. Dissertação (Mestrado) - Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2007.

SPINACÉ, M. A. S; LAMBERT, C. S; FERMOSELLI, K. K. G; DE PAOLI, M-A. **Characterization of lignocellulosic curaua fibres**. Carbohydrate Polymers, v. 77, p. 47–53, 2009.

SUCHISMITA, Arpita. **A Study of Effects of Binder Quality and Natural Fiber on Stone Matrix Asphalt Mixtures**. Thesis (Master) - Department Of Civil Engineering,

National Institute Of Technology. Rourkela, 2009.

TAVARES, Maria Goretti da Costa. **A Amazônia Brasileira: Formação Histórico-Territorial e Perspectivas para o Século XXI**. Revista GEOUSP - Espaço e Tempo. n. 29 - Especial. p. 107-121. São Paulo, 2011.

THEISEN, Klaus Machado. **Aplicação do Princípio da Correspondência Elasto-viscoelástica para Previsão de Deformabilidade de Misturas Asfálticas**. 2006. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.

TOMCZAK, F; SATYANARAYANA, K. G; SYDENSTRICKER, T. H. D. **Studies on lignocellulosic fibers of Brazil: Part III – Morphology and properties of Brazilian curauá fibers**. Composites: Part A, v. 38, p. 2227–2236. 2007.

VALE, A. C. DO; SOARES, J. B; CASAGRANDE, M. D. T. **Aplicabilidade de Fibras de Coco em Misturas Asfálticas Tipo SMA**. In: Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo e Gás – PDPETRO, 4, Campinas: 2007.

VALE, Aline Colares do. **Estudo Laboratorial da Viabilidade do uso de Fibras de Coco em Misturas Asfálticas do tipo SMA**. 2007. Dissertação (Mestrado) – Programa de Mestrado em Engenharia de Transportes, Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2007.

VENTURA, O. S. P; PASSOS, O. S; LOBO, J. B; FUJIYAMA, R. T. **Caracterização Mecânica em Flexão de Compósito de Argamassa de Cimento Reforçada por Fibras Naturais**. In: Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, 17. Foz do Iguaçu, 2006. v. 1.

VILLAMOR, Francisco Gallart. **Evaluación en Laboratorio de La Durabilidad de Mesclas Bituminosas tipo SMA**. Projecte (Tesina) - Infraestructura del Transporte y Territorio, Universitat Politècnica de Catalunya, 2011.

ZAH, R; HISCHIER, R; LEÃO, A. L; BRAUN, I. **Curauá fibers in the automobile industry e a sustainability assessment**. Journal of Cleaner Production, v. 15, p. 1032-1040, 2007.

ZHANG, J; HUANG, X; WU, J; XIE, M. **The Application of Digital Image Processing Technology in the Quantitative Study of the Coarse Aggregate Shape Characteristics**. In: International Conference on Information Science and Engineering. 2009.

ZHU, J; WU, S; ZHONG, J; WANG, D. **Investigation of asphalt mixture containing demolition waste obtained from earthquake-damaged buildings**. Construction and Building Materials, 29, p. 466–475, 2012.

ZOK, FRANK W. LEVI, CARLOS G. **Mechanical Properties of Porous - Matrix Ceramic Composites**. Advanced Engineering Materials. n. 1-2. p. 15-23. 2001.