



UNIVERSIDADE ESTADUAL DO MARANHÃO
CENTRO DE CIÊNCIAS TECNOLÓGICAS
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL
DEPARTAMENTO DE EXPRESSÕES GRÁFICAS E TRANSPORTES

SAMUEL COSTA DE SOUSA

**ESTUDO DE MISTURA ASFÁLTICA TIPO SMA (STONE MATRIX ASPHALT)
COM USO DE FIBRAS DE BABAÇU**

São Luís - MA
2016

SAMUEL COSTA DE SOUSA

**ESTUDO DE MISTURA ASFÁLTICA TIPO SMA (STONE MATRIX ASPHALT)
COM USO DE FIBRAS DE BABAÇU**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Estadual do Maranhão para obtenção do grau de bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Profa. Dra. Maria Teresinha de Medeiros Coelho

São Luís - MA
2016

Sousa, Samuel Costa de

Estudo de mistura asfáltica tipo SMA (STRONE MATRIX ASPHALT) com uso de fibras de babaçu / Samuel Costa de Sousa– São Luís, 2016.

99 f

Monografia (Graduação) – Curso de Engenharia Civil, Universidade Estadual do Maranhão, 2016.

Orientadora: Profª Drª Maria Teresinha de Medeiros Coelho

1.SMA. 2.Fibras de babaçu. 3. Escorrimento. I.Título

CDU:625.85:633.85

A meu Deus, que me concedeu sua graça e auxílio diante de todas as minhas necessidades ao longo destes anos. A minha família, que mesmo distante, me incentivou e colaborou com todo amor e carinho.

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela vida, pela saúde, por me conceder a oportunidade de alcançar a vitória diante das dificuldades e me presentear com talentos, capacidades e força para superar cada desafio que surgiu.

Aos meus pais, Edimar Alves de Sousa e Jucilene Costa de Sousa por todo auxílio, ensinamentos, carinho e amor que me deram ao longo desses anos, sendo fontes de inspiração e determinação para mim, que mesmo em meio às dificuldades sempre encontraram a solução para a resolução de todos os obstáculos que surgiram.

A minha namorada, Dayane, pela compreensão, auxílio, companhia, carinho e amor me proporcionando determinação para alcançar todos os meus objetivos.

A minha orientadora, Profa. Dra. Maria Terezinha, pelo incentivo, auxílio e suporte essenciais para o desenvolvimento deste estudo.

Ao Prof. Dr. Walter Canales, pelos conselhos, ideias e materiais concedidos, que foram de fundamental importância para evolução deste trabalho.

Aos meus amigos e companheiros de laboratório, Bruno Henrique, João Vitor Pestana e Guilherme Barbosa pelo auxílio na obtenção dos materiais, pela ajuda na execução dos ensaios, conselhos e momentos de descontração.

A todas as amizades formadas durante esses anos no decorrer do curso, que serviram de apoio para que esse objetivo se concretizasse.

A Universidade Estadual do Maranhão, todos os professores, amigos e terceiros que proporcionaram e participaram de forma direta ou indireta na conquista dos conhecimentos acadêmicos necessários para minha formação em engenharia civil.

“Todo mundo passa por fases difíceis. A forma como você lida com elas é a medida da sua determinação e dedicação”

Lakshmi Mittal

RESUMO

Este estudo tem por objetivo principal analisar como a adição de fibras provenientes do epicarpo (“parte externa da casca”) do fruto do babaçu, alteram no escorrimento do ligante e nas propriedades mecânicas da mistura asfáltica Stone Matrix Asphalt (SMA) estudada (faixa 25mm da AASTHO MP8-01). Com o intuito de se desenvolver uma mistura que apresente uma maior durabilidade e uma maior resistência aos esforços produzidos pelo tráfego e clima, diante dos diversos problemas enfrentados nas estruturas dos pavimentos do nosso país. A mistura SMA se mostra ideal para rodovias com alto volume de tráfego, por apresentar em suas características uma boa estabilidade, flexibilidade, resistência ao desgaste, dentre outras. O principal objetivo da adição das fibras do babaçu foi evitar o escorrimento do ligante asfáltico que apresenta de forma marcante altos valores de teor para este tipo de revestimento. A análise do escorrimento foi feita pelo método de Schellenberg, utilizando misturas não compactadas com mesmos 6% de CAP 50/70 para 5 teores diferentes de fibra. Estas, foram compactadas na fabricação de corpos de prova para avaliação da estabilidade Marshall e resistência à tração por compressão diametral em função da porcentagem de fibras, assim também como para outros parâmetros, tais como volume de vazios, volume de agregado mineral, etc. O aumento da porcentagem da fibra, diminuiu de forma gradativa o escorrimento do ligante, no entanto para atender aos requisitos de escorrimento da norma da AASHTO MP8-01 foi necessário um teor elevado de fibra se comparado com a porcentagem recomendada.

Palavras-chave: Stone Matrix Asphalt, Fibras de babaçu, Escorrimento

ABSTRACT

This study is meant to examine how the addition of from the epicarp fibers ("outside of the shell") babassu fruit, change in the binder runoff and mechanical properties of the asphalt mixture Stone Matrix Asphalt (SMA) studied (range 25mm AASTHO the MP8-01). In order to develop a mixture that presents greater durability and greater resistance to stresses produced by traffic and weather, on the various problems faced in our country's pavement structures. SMA mixture shown ideal for roads with high traffic volumes, by presenting in its features a good stability, flexibility, wear resistance, among others. The main purpose of the addition of babassu fibers was to prevent runoff of asphalt binder which has markedly high content values for this type of coating. The analysis of the bleeding was taken by Schellenberg method using uncompressed mixtures thereof with 6% of 50/70 CAP for 5 different fiber contents. These were packed in the manufacture of test specimens for evaluation of Marshall stability and tensile strength by diametrical compression depending on the percentage of fibers, so as for other parameters, such as void volume, volume of mineral aggregate, etc. Increasing the percentage of fiber, gradually decreased run-off of the binder, however to meet the requirements of the standard drip AASHTO MP8-01 a high content of fiber had to be compared to the recommended percentage.

Keywords: Stone Matrix Asphalt, babassu fibers, Runoff

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Estrutura típica de pavimento rígido	25
Figura 2 - Distribuição dos carregamentos nos pavimentos rígido e flexível	26
Figura 3 - Estrutura típica de pavimento flexível	27
Figura 4 - Representação das curvas granulométricas das graduações dos agregados.....	30
Figura 5 - Destilação Fracionada do Petróleo, numa Torre de Destilação.....	32
Figura 6 - Exemplos de defeitos de pavimentos flexíveis.....	35
Figura 7 - Restauração com capa asfáltica em Concreto Betuminoso Usinado a Quente.....	37
Figura 8 - Esquema de Funcionamento da Camada Porosa de Atrito.....	38
Figura 9 - Comparação entre misturas SMA e misturas densas convencionais.....	40
Figura 10 - Curvas granulométricas de diferentes misturas asfálticas a quente.....	40
Figura 11 - Detalhamento do esqueleto mineral da mistura SMA.....	41
Figura 12 - Faixas granulométricas dos agregados segundo especificação alemã.....	42
Figura 13 - Mistura SMA sem fibra e com fibra.....	46
Figura 14 - Especificação alemã para misturas SMA.....	48
Figura 15 - Especificações da mistura SMA para a AASHTO MP8-01.....	48
Figura 16 - Componentes do fruto do babaçu e algumas de suas possíveis utilizações.....	52
Figura 17 - Amostra de fibras do epicarpo do fruto do babaçu utilizadas na pesquisa.....	52
Figura 18 - Corpo de prova com 0,5% de fibra de babaçu, após a compactação.....	54
Figura 19 - Momento da adição das fibras na mistura.....	54
Figura 20 - Sequências Decrescente das Peneiras e Balança de Precisão.....	55
Figura 21 - Máquina Los Angeles.....	56
Figura 22 - Amostra imersa em água.....	57
Figura 23 - Enxugamento dos agregados.....	58
Figura 24 - Uso do paquímetro para medição de dimensão da amostra.....	59

Figura 25 - Proveta graduada para leitura dos níveis de areia e argila.....	60
Figura 26 - Procedimento de determinação da massa específica do agregado graúdo.....	61
Figura 27: Frasco Chapman para determinação da massa específica dos agregados miúdos..	62
Figura 28: Frasco Le Chatelier e querosene utilizado.....	63
Figura 29: Resfriamento e imersão da mistura em água.....	64
Figura 30: Penetrômetro para avaliação da penetração da agulha na amostra de CAP.....	65
Figura 31: Avaliação da viscosidade.....	66
Figura 32: Ensaio de ponto de amolecimento do CAP.....	67
Figura 33: Procedimento do ensaio de Escorrimento Método de Schellenberg.....	68
Figura 34: Procedimento da mistura e compactação dos CP's.....	70
Figura 35: Pesagem do corpo de prova.....	72
Figura 36: Definição do volume do CP pelo volume deslocado de água.....	72
Figura 37: Medição de dimensões dos CP's e imersão em banho maria.....	73
Figura 38: Prensa Marshall automática.....	73
Figura 39: Prensa Marshall e detalhe dos anéis envoltórios.....	75
Figura 40: Escorrimento contido nos béqueres após conclusão do ensaio.....	89
Figura 41: Parâmetros Marshall da mistura compactada.....	90

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Causas da deformação permanente.....	33
Quadro 2: Faixas granulométricas dos agregados segundo AASHTO MP8-01.....	42
Quadro 3: Recomendações Finlandesas para adição de fibras conforme sua natureza.....	46
Quadro 4: Amostra de fibras do epicarpo do babaçu utilizadas na pesquisa.....	52
Quadro 5: Granulometria dos Agregados.....	75
Quadro 6: Faixas granulométricas SMA, (porcentagem de volume que passa).....	79
Quadro 7: Resistência à abrasão da brita 1 e brita 0.....	80
Quadro 8: Absorção da brita 1 e brita 0.....	80
Quadro 9: Equivalente de areia da Areia e Pó de Brita.....	82
Quadro 10: Massa Específica dos materiais.....	83
Quadro 11: Quadro-resumo de avaliação das propriedades estudadas dos agregados.....	84
Quadro 12: Ensaio de Penetração do CAP 50/70.....	85
Quadro 13: Viscosidade do ligante nas temperaturas de ensaio.....	85
Quadro 14: Temperatura de Amolecimento do CAP.....	86
Quadro 15: Quadro-resumo de avaliação das propriedades estudadas do ligante.....	87
Quadro 16: Verificação do escorrimento com a variação da porcentagem de fibra.....	88
Quadro 17: Média do escorrimento para cada porcentagem de fibra.....	88
Quadro 18: Parâmetros Marshall dos CP's com teor ótimo de fibra.....	92
Quadro 19: Estabilidade dos corpos de prova com teor ótimo de fibra.....	91
Quadro 20: Fluência dos corpos de prova com teor ótimo de fibra.....	92
Quadro 21: Resistência à tração dos corpos de prova com teor ótimo de fibra.....	92
Quadro 22: Resumo das propriedades do teor ótimo de fibra da mistura estudada.....	92
Quadro 23: Comparação entre os parâmetros da mistura estudada e a os da norma adotada...93	

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Curva granulométrica da Brita 1.....	77
Gráfico 2: Curva granulométrica da Brita 0.....	77
Gráfico 3: Curva granulométrica do Pó de Brita.....	78
Gráfico 4: Curva granulométrica da Areia.....	78
Gráfico 5: Curva granulométrica do Fíler (Cimento).....	79
Gráfico 6: Curva granulométrica da mistura entre as faixas limítrofes da norma.....	80
Gráfico 7: Viscosidade em função da temperatura do ligante.....	86
Gráfico 8: Variação do escorrimento de ligante em função da adição de fibra.....	88
Gráfico 9: Variação da estabilidade em função da adição de fibra.....	90
Gráfico 10: Variação da resistência à tração em função da adição de fibra.....	91

LISTA DE SIGLAS

AASHTO	-American Association of State Highway and Transportation Officials
ABNT	-Associação Brasileira de Normas Técnicas
AMP	-Asfalto Modificado por Polímero
BGS	- Brita graduada simples
BGTC	- Brita graduada tratada com cimento
CAP	- Concreto Asfáltico de Petróleo
CAUQ	- Concreto Asfáltico Usinado a Quente
CBUQ	- Concreto Betuminoso Usinado a Quente
CBR	- Índice de Suporte Califórnia
CNT	- Confederação Nacional do Transporte
CP's	- Corpos de provas
CPA	- Camada Porosa de atrito
DNER	- Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DNIT	- Departamento Nacional de Infraestrutura e Transportes
EAPA	- European Asphalt Pavement Association
EMBRAPA	- Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
LSP	- Laboratório de Mecânica dos Solos e Pavimentação
NAPA	- National Asphalt Pavement Association
NBR	- Norma Brasileira
RBV	- Relação Betume-Vazios
RPM	- Rotações Por Minuto
SMA	- Stone Matrix Asphalt
UEMA	- Universidade Estadual do Maranhão
VAM	- Volume de Vazios no Agregado Mineral
VCB	- Volume Cheio de Betume
Vv	- Volume de vazios
RBV	- Relação Betume/Vazios

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	18
1.1	TÍTULO	19
1.2	OBJETIVOS	19
1.2.1	Objetivo Geral.....	20
1.2.2	Objetivos Específicos	20
1.2	JUSTIFICATIVA	20
1.3	METODOLOGIA	21
1.4	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	22
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	23
2.1	TIPOS DE PAVIMENTOS.....	24
2.1.1	Pavimento Rígido.....	24
2.1.2	Pavimento Flexível.....	25
2.2	REVESTIMENTOS ASFÁLTICOS	27
2.2.1	Agregados	28
2.2.1.1	Classificação dos Agregados	28
2.2.1.2	Produção dos Agregados	30
2.2.2	Ligante asfáltico	31
2.2.3	Produção de Asfalto	31
2.3	DEFEITOS NOS REVESTIMENTOS ASFÁLTICOS	32
2.3.1	Avaliação da Condição Funcional e Estrutural	32
2.3.2	Deformações nos pavimentos.....	33
2.3.3	Defeitos na superfície dos pavimentos	34
2.4	PRINCIPAIS TIPOS DE MISTURAS ASFÁLTICAS USINADAS A QUENTE	36
2.4.1	Concreto Asfáltico (CA).....	36
2.4.2	Camada Porosa de Atrito (CPA)	37
2.5	STONE MATRIX ASPHALT (SMA)	38
2.5.1	Breve Histórico do SMA	38
2.5.2	Características gerais do SMA	39
2.5.3	Materiais que compõem a mistura	41
2.5.3.1	Agregados Graúdos	41

2.5.3.2	Mástique da mistura.....	43
2.5.3.2.1	<i>Agregados Miúdos</i>	43
2.5.3.2.2	<i>Ligante</i>	44
2.5.3.2.3	<i>Material de enchimento (Fíler)</i>	45
2.5.3.2.4	<i>Agente Estabilizador (Fibras)</i>	45
2.5.4	Especificação e Aplicação da mistura.....	48
2.5.5	Vantagens e Desvantagens da mistura.....	49
3	MATERIAIS E METODOLOGIA.....	51
3.1	FIBRAS DE BABAÇU.....	51
3.1.1	Observações iniciais quanto a quantidade adicionada de fibras nos CP's.....	53
3.2	ENSAIOS LABORATORIAIS NOS AGREGADOS.....	54
3.2.1	Ensaio nos Agregados Minerais.....	55
3.2.1.1	Granulometria dos Agregados.....	55
3.2.1.2	Resistência à Abrasão.....	56
3.2.1.3	Absorção dos Agregados Graúdos.....	57
3.2.1.4	Índice de Forma.....	58
3.2.1.5	Equivalente de Areia.....	59
3.2.1.6	Massa Específica dos Agregados Graúdos.....	60
3.2.1.7	Massa Específica dos Agregados Miúdos pelo frasco Chapman.....	61
3.2.1.8	Massa Específica pelo frasco Le Chatelier.....	62
3.2.1.9	Adesividade ao Ligante Asfáltico.....	63
3.2.2	Ensaio no Ligante Asfáltico.....	64
3.2.2.1	Ensaio de Penetração.....	64
3.2.2.2	Ensaio de Viscosidade Saybolt-Furol.....	65
3.2.2.3	Ensaio de Ponto de Amolecimento (Anel e Bola).....	66
3.2.3	Ensaio na Mistura Asfáltica.....	67
3.2.3.1	Ensaio de Escorrimento (Método de Schellenberg).....	67
3.2.3.2	Dosagem Marshall.....	68
3.2.3.3	Estabilidade Marshall e Fluência.....	72
3.2.3.4	Resistência à Tração.....	74
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	76
4.1	RESULTADOS DOS ENSAIOS NOS AGREGADOS.....	76
4.1.1	Granulometria.....	76
4.1.2	Enquadramento Granulométrico.....	79
4.1.3	Resistência à Abrasão.....	81
4.1.4	Absorção.....	81
4.1.5	Índice de Forma.....	82

4.1.6	Equivalente de Areia	82
4.1.7	Massa Específica	83
4.1.8	Adesividade ao Ligante	83
4.1.9	Avaliação Geral das Propriedades dos Agregados	84
4.2	REULTADOS DOS ENSAIOS NO LIGANTE	84
4.2.1	Penetração	85
4.2.2	Viscosidade Saybolt-Furol	85
4.2.3	Ponto de Amolecimento.....	86
4.2.4	Avaliação geral das propriedades do ligante.....	87
4.3	RESULTADOS DOS ENSAIOS NA MISTURA ASFÁLTICA	87
4.3.1	Escorrimento	87
4.3.2	Parâmetros da dosagem Marshall.....	89
4.3.3	Estabilidade	91
4.3.4	Resistência à Tração	91
4.3.5	Teor Ótimo de Fibra.....	92
4.3.6	Avaliação geral das propriedades da mistura SMA estudada.....	94
5	CONCLUSÃO	95
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	97

1 INTRODUÇÃO

O Brasil apresenta diversos problemas relacionados à estrutura dos pavimentos flexíveis, como mostra a Confederação Nacional de Transportes (CNT) em pesquisas de rodovias (2015), nessa pesquisa, essa destaca o não atendimento às exigências técnicas, tanto da capacidade de suporte das camadas do pavimento, como da qualidade dos materiais empregados no revestimento. Falhas construtivas apresentam como consequência de um processo de deformação mais acelerado o que resulta em maiores custos com a reparação desses pavimentos para obtenção de condições ideais de tráfego.

A existência de um bom pavimento requer manutenção periódica. Segundo a CNT (2015), os defeitos e as irregularidades na superfície do revestimento impactam diretamente nos custos operacionais, por conta dos maiores gastos com a manutenção dos veículos, com consumo de combustível e pneus, elevação dos tempos de viagem, entre outros.

Diversos trabalhos de pavimentação atualmente referem-se à manutenção e ao reforço de rodovias existentes, demonstra-se uma maior preocupação com a qualidade da superfície quanto ao conforto e a segurança dos usuários em todas as condições climáticas. Portanto, necessita-se do desenvolvimento de novas concepções de misturas asfálticas o que exige a utilização de asfaltos modificados (BERNUCCI et al, 2006).

A mistura asfáltica SMA é uma mistura a quente de graduação descontínua e densa, e apresenta uma grande proporção de agregado graúdo, de preferência totalmente britado. Esta configuração amplia o contato entre os agregados minerais graúdos, aumentando assim a interação entre os grãos (MOURÃO, 2003).

“Devido a essa particular graduação, forma-se um grande volume de vazios entre os agregados graúdos. Esses vazios, por sua vez, são preenchidos por um mástique asfáltico, constituído pela mistura da fração areia, fíler, ligante asfáltico e fibras” (BERNUCCI et al, 2006, p.168).

As fibras são adicionadas às misturas SMA com o objetivo de se evitar o escorrimento do ligante durante o processo de construção (produção e aplicação da mistura), principalmente durante o transporte. Normalmente, depois da compactação, as fibras não têm influência sobre o desempenho da mistura (NEVES FILHO, 2004).

Neste estudo, fibras da casca do babaçu serão incorporadas no mástique da mistura SMA substituindo às fibras de celulose normalmente utilizadas. O fato do uso de fibras de babaçu se deve à predominância do fruto na região maranhense. A pesquisa de

produção agrícola realizada pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) do ano de 2014, apresenta as estatísticas de produção da extração vegetal e da silvicultura, e revelam a produção de 83.917 toneladas de amêndoas provenientes do babaçu, sendo que o maranhão foi responsável por 79.305 toneladas, correspondendo a 94,5% da produção anual do país.

O principal produto extraído do babaçu, e que possui valor mercantil e industrial, são as amêndoas contidas em seus frutos. No entanto, suas folhas servem de matéria-prima para a fabricação de utilitários, o estipe do babaçu, quando apodrecido, serve de adubo, a casca do coco, devidamente preparada, fornece um eficiente carvão, entre outros. Mesmo apresentando diversas utilidades, por sua ocorrência não ser controlada do ponto de vista econômico e agrícola, o babaçu continua a ser tratado como um recurso marginal, permanecendo apenas como parte integrante dos sistemas tradicionais e de subsistência (BIODIESELBR, 2006).

Considera-se então uma alternativa apreciável o uso das fibras da casca do babaçu no SMA. Este estudo, objetiva avaliar e comprovar que os parâmetros da mistura a ser avaliada, como estabilidade, escorrimento, resistência a tração, entre outros, estejam dentro dos padrões especificados por normas futuramente descritas. E visa à obtenção de um revestimento asfáltico destinado às rodovias com alto volume de tráfego, onde se alcance uma maior durabilidade e uma maior resistência aos esforços produzidos pelo tráfego e clima.

Cabe lembrar que não há conhecimento do uso de fibras do babaçu em misturas SMA nas rodovias. No entanto, segundo Neves filho (2004), o uso de fibras como as de celulose ou de vidro já são de uso frequente no estado de São Paulo, apresentando bons resultados, como por exemplo no autódromo de Interlagos e na curva da onça, localizada na Via Anchieta que liga São Paulo a Santos.

1.1 TÍTULO

Estudo de mistura asfáltica tipo SMA (Stone Matrix Asphalt), com uso de fibras de babaçu.

1.2 OBJETIVOS

A seguir serão apresentados os objetivos geral e específicos do presente estudo.

1.2.1 Objetivo Geral

Analisar a viabilidade da adição de fibras de babaçu no mástique da mistura asfáltica tipo SMA (Stone Matrix Asphalt).

1.2.2 Objetivos Específicos

- Prosseguir com o estudo de SMA do laboratório de mecânica dos solos e pavimentação da Universidade Estadual do Maranhão;
- Avaliar propriedades mecânicas e escorrimento de misturas SMA com adição de fibras de babaçu;
- Sugerir um traço para utilização de misturas SMA com adição de fibras de coco babaçu.

1.2 JUSTIFICATIVA

Conforme a CNT (2015) as condições gerais ruins das rodovias brasileiras reduzem a segurança, aumentam o consumo de combustível e o tempo de viagem, além dos custos de manutenção dos veículos, de lubrificantes, de pneus e de freios. Para a CNT, as vias onde o pavimento é considerado péssimo, o aumento chega a 91,5%. Em rodovias ruins, o aumento é de 65,6%; em regulares, 41,0%. Nas rodovias com pavimento bom, o incremento foi calculado em 18,8%. Quando o pavimento é considerado ótimo, não há aumento do custo operacional.

A pesquisa de rodovias do Conselho Nacional de Transporte (2015) identificou 48.897 km de rodovias com algum tipo de deficiência no pavimento o que corresponde a 48,6% das rodovias analisadas, 35,4% dos revestimentos foram classificados como regular, 10,1% como ruim e 3,1% como péssimo. Ainda em relação à avaliação do pavimento, 41,6% da extensão pesquisada encontravam-se em ótimo estado de conservação e 9,8% em bom estado.

Segundo previsão oficial realizada em 2014 pelo Ministério de Minas e Energia, o número de automóveis no país vai quase quadruplicar até 2050. Essa estimativa foi incluída no Plano Nacional de Energia 2050. Conforme o PNE, a frota de veículos leves deverá saltar de 36 milhões em 2013 para 130 milhões em 2050.

O aumento do volume de tráfego e da carga dos veículos nas vias e rodovias, ampliará ainda mais as deficiências e irregularidades dos pavimentos, causando impactos ainda maiores nos custos operacionais.

É imprescindível o desenvolvimento de misturas asfálticas mais resistentes e mais duráveis. Esta pesquisa, planeja contribuir no desenvolvimento de um revestimento asfáltico que estabeleça tais características e promova melhorias nas condições da malha rodoviária do país.

1.3 METODOLOGIA

O presente estudo tem uma abordagem qualitativa explicativa. A princípio foi realizada uma pesquisa bibliográfica na busca por informações e dados sobre o SMA e o uso de fibras neste revestimento. Foram apuradas as principais normas que abordam sobre o tema, examinados livros, artigos e demais trabalhos científicos, para compor o referencial teórico da pesquisa. Ressalta-se que o projeto dará continuidade às pesquisas anteriores sobre o tema, desenvolvidas na Universidade Estadual do Maranhão. A principal norma utilizada será a (AASHTO) MP8-01 da American Association of State Highway and Transportation Officials, norma americana que delimita os requisitos e especificações para a elaboração da mistura asfáltica do tipo SMA.

A seguir, foram executados no laboratório de mecânica dos solos e pavimentação (LSP) da UEMA, os ensaios de caracterização dos materiais que compõem o revestimento asfáltico como os agregados graúdos, fíler, areia e ligante asfáltico. Dentre os ensaios destacam-se os ensaios de densidade e absorção (DNER-ME 081/98), abrasão “Los Angeles” (DNER-ME 035/98), adesividade (DNER-ME 078/94) e de granulometria (DNER-ME 083/98, entre outros.

Ao término dos ensaios de caracterização dos materiais de composição do revestimento do tipo SMA, foram realizados ensaios na mistura asfáltica por meio da produção de corpos de prova, verificando-se as características adequadas de um revestimento do tipo SMA, de acordo com as normas que foram vigentes. Dentre esses ensaios, serão executados o ensaio de escorrimento pelo método de Schellenberg (norma europeia EN 12697-18), dosagem Marshall (DNER-ME 043/95) e o ensaio de resistência a tração por compressão diametral.

Concluindo-se todos os ensaios, foram analisados os resultados obtidos, comparando-se aos valores dos requisitos técnicos exigidos pelas normas futuramente descritas, em principal a AASHTO MP8-01.

1.4 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Neste capítulo, (Capítulo 1), levantam-se algumas informações iniciais que fundamentam e expressam a importância do tema a ser estudado, apontam-se os objetivos a serem atingidos, a justificativa a partir da série de problemas encontrados nos pavimentos do país e a metodologia a ser realizada.

O Capítulo 2 aborda, de forma geral, sobre pavimento e seus principais tipos (pavimento rígido e flexível), os revestimentos asfálticos, seus componentes, os defeitos e deformações gerados nestes e os principais tipos de mistura asfáltica usinadas a quente, para os revestimentos, destacando suas principais características. São abordados também um breve histórico do SMA, suas características gerais, a constituição da mistura e características dos seus materiais, algumas especificações e locais em que foram aplicados esta mistura, certas considerações sobre os custos dessa mistura e suas vantagens e desvantagens na aplicação.

No Capítulo 3, são expostos os materiais utilizados neste estudo e como foram obtidos, a metodologia utilizada e a descrição dos ensaios realizados no laboratório que possibilitaram alcançar os resultados deste estudo.

No Capítulo 4, são representados e comentados os resultados das características dos materiais (ligante asfáltico, agregados e fibras), da mistura asfáltica considerada no estudo. O parecer dos resultados será avaliado de acordo com as características apresentadas nas normas específicas da mistura asfáltica.

No Capítulo 5, são apresentados os resultados deste estudo, as principais conclusões encontradas e serão apontadas possíveis sugestões para trabalhos e estudos futuro.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Os materiais de construção manifestam ao longo de sua vida útil de serviço, processos de danificação e deterioração que não se podem evitar, e que provocam a modificação de suas propriedades mecânicas, o que altera o desempenho dos mesmos, quando estão perante ações de diversas naturezas. Nos materiais que constituem as camadas de pavimentos não ocorrem diferente, o motivo da degradação são as cargas de veículos, produtos químicos, além de ações ambientais como a temperatura, umidades, etc (BALBO, 2007).

Segundo matéria da revista *Época* (2013), a principal causa da deterioração das rodovias são os caminhões com carga acima do peso permitido, e esse desrespeito, resulta em custos altíssimos para o país, em março de 2013 a Controladoria Geral da União avaliou em cerca de R\$ 1,6 bilhão por ano em prejuízos ao governo pela escassez de fiscalização e combate ao excesso de carga que transitam nas estradas federais. E isso não inclui somente o transporte de cargas de pequenas empresas, até empresas grandes como a Petrobrás contribuem para a destruição das rodovias brasileiras.

Além do mais, a ausência praticamente total da manutenção preventiva, tem preocupado bastante os técnicos que trabalham na área de conservação de vias urbana, pois se observa um grande nível de deterioração. As cidades de médio e grande porte no Estado de São Paulo por exemplo, tem apresentado uma elevada quantidade de trincas, o que torna caótica a situação da malha viária, visto que essas trincas rompem em alguns pontos da rede e evoluem para panelas, além disso, o envelhecimento do ligante e a abertura de valas e remendos mal executados por concessionárias de serviços públicos, adiantam ainda mais a destruição da malha viária (VILLIBOR et al, 2009).

É de enorme importância então, a pesquisa e o estudo de novas misturas asfálticas que desenvolvam e apresentem características e propriedades que sejam adequadas a um volume de tráfego mais intenso e que mantenham a durabilidade diante da previsão do tráfego futuro, no entanto destaca-se que deve haver um aumento da preocupação e zelo para com a conservação das vias existentes por parte da população e o crescimento da fiscalização quanto ao transporte de cargas nas rodovias.

2.1 TIPOS DE PAVIMENTOS

Pavimento é uma estrutura de múltiplas camadas de espessuras finitas, construída sobre a superfície final de terraplenagem, destinada técnica e economicamente a resistir aos esforços oriundos do tráfego de veículos e do clima, e a propiciar aos usuários melhoria nas condições de rolamento, com conforto, economia e segurança (BERNUCCI et al, 2006, pág.9).

Os pavimentos são divididos em três tipos: os pavimentos rígidos, semirrígidos e flexíveis. No entanto, os pavimentos rodoviários mais usuais são os rígidos e flexíveis, além do mais alguns autores desconsideram a definição do pavimento semirrígido. Logo, não será abordado sobre este tipo de pavimento, dando-se destaque aos mais habituais.

Conforme DNIT (2006), os pavimentos possuem diversos constituintes, para este trabalho destacou-se os principais, logo, temos:

- Revestimento: é a camada que deve ser impermeável o máximo possível, que recebe de modo direto a ação do rolamento dos veículos, devendo melhorá-la em relação à comodidade, segurança e a resistência ao desgaste;
- Base: executada abaixo do revestimento, esta camada tem por objetivo resistir e distribuir os esforços provenientes do tráfego para as camadas subjacentes;
- Sub-base: camada complementar à base, é aconselhada a ser utilizada quando por questões técnico-econômicas não puder se construir a base diretamente sobre a regularização do subleito;
- Reforço do subleito: camada de espessura constante com características geotécnicas inferiores às camadas superiores, porém melhores que o material do subleito.
- Subleito: é o terreno de fundação do pavimento.

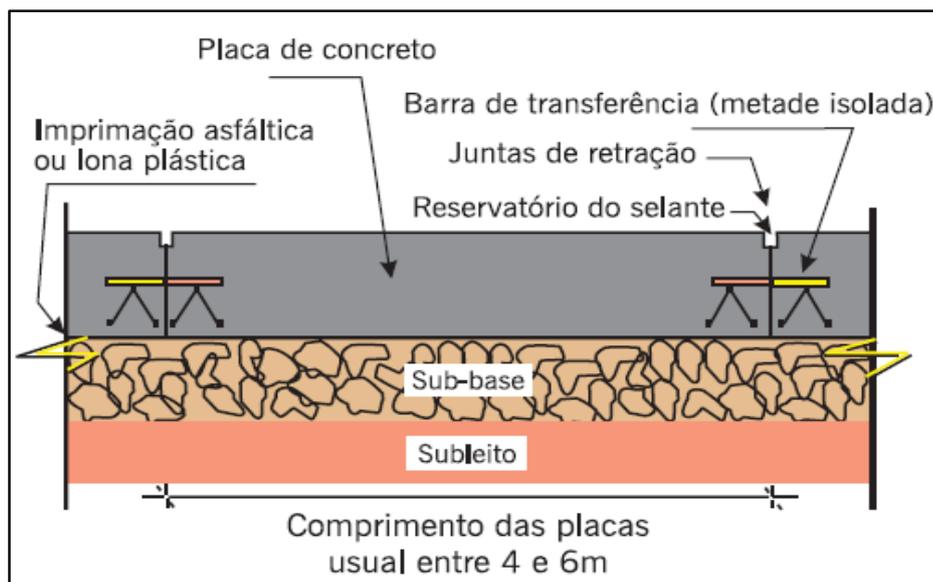
2.1.1 Pavimento Rígido

Segundo o DNIT (2006), pavimento rígido é aquele que apresenta uma elevada rigidez se comparado às camadas inferiores absorvendo então, praticamente todas as tensões geradas pelo carregamento aplicado. Senço (2007) diz que, são aqueles pavimentos que pouco se deformam, constituídos principalmente de concreto de cimento que se rompem por tração na flexão quando submetido a deformações.

As camadas que constituem os pavimentos rígidos são (BERNUCCI et al, 2006; DNIT, 2006):

- Revestimento: formado por placas de cimento Portland que podem ser armadas ou não. O revestimento serve também como base nesse tipo de pavimento;
- Sub-base: camada de apoio do revestimento, esta pode utilizar material granular ou material estabilizado com cimento, sendo mais usado o material estabilizado com cimento;
- Reforço de subleito: camada necessária quando o subleito não apresentar resistência adequada para suportar o pavimento. A análise é feita pelo ensaio de Índice de Suporte Califórnia (ISC ou CBR) que determina a resistência máxima até a ruptura, e ensaios de caracterização (granulometria, LL, LP). Pode-se utilizar material granular, materiais estabilizados quimicamente ou cimentados;
- Subleito: é o terreno de fundação, natural do pavimento.

Figura 1: Estrutura típica de pavimento rígido



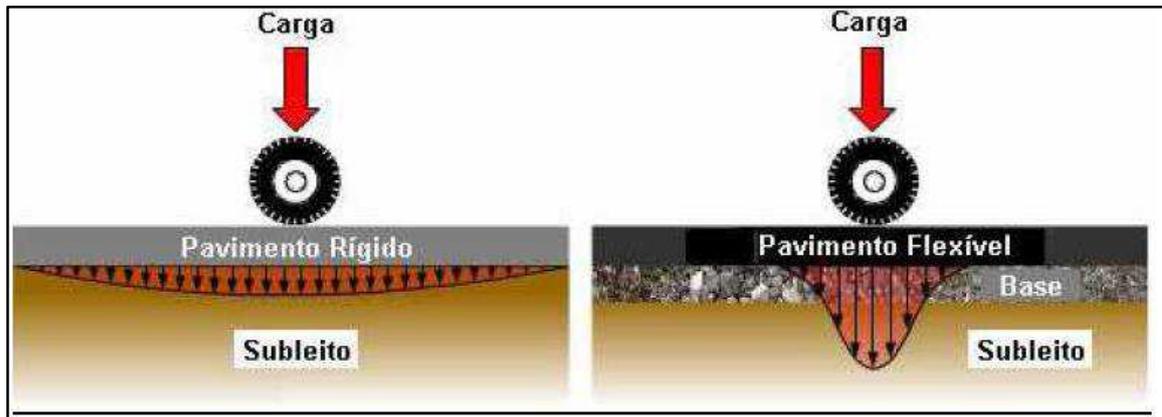
Fonte: Bernucci et al. (2006)

2.1.2 Pavimento Flexível

Conforme o DNIT (2006), é aquele em que todas as camadas que constituem o pavimento, sofrem deformação elástica considerável com o carregamento aplicado, com isso verifica-se que a carga se divide de maneira semelhante entre as camadas. Senço (2007) fala, que este normalmente é dimensionado à compressão e à tração na flexão, provocada pelo aparecimento das bacias de deformação sob as rodas dos veículos, que levam a estrutura a se

deformar de forma permanente. A aplicação de carregamento no pavimento até certas medidas, não o leva ao rompimento, no entanto, a repetição frequente das cargas provocará o rompimento por fadiga.

Figura 2: Distribuição dos carregamentos nos pavimentos rígido e flexível

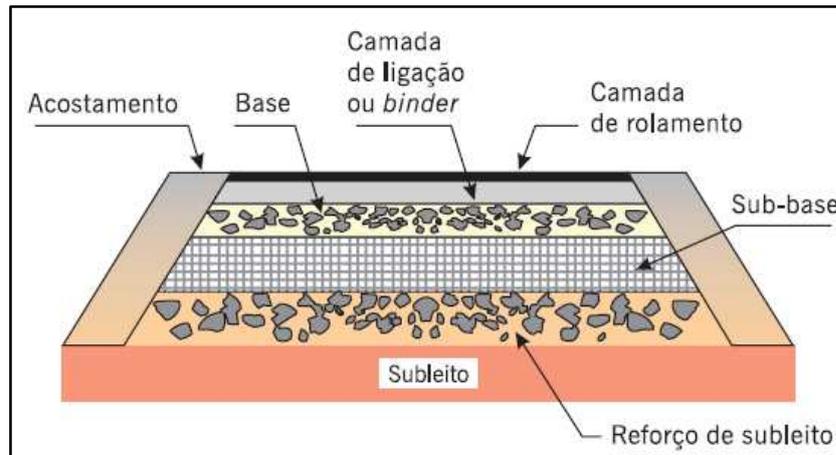


Fonte: Moura (2011)

Assim como o pavimento rígido, o pavimento flexível como dito acima, é constituído por diversas camadas, sendo estas (BERNUCCI et al, 2006; DNIT, 2006):

- **Revestimento:** com o objetivo de melhorar o rolamento dos veículos, o conforto e segurança do pavimento, compõem-se geralmente de misturas feitas de agregados e ligantes asfálticos. Além da camada de rolamento, há camadas intermediárias, ou de ligação, à camada subjacente;
- **Base:** para resistir e distribuir os esforços provenientes do tráfego utilizam-se materiais granulares e solos, como: brita graduada simples (BGS), bica ou brita corrida e macadame hidráulico; também podem ser utilizados materiais cimentados, como: brita graduada tratada com cimento (BGTC), solo-cimento, solo-cal, entre outros;
- **Sub-base:** camada que objetiva complementar a distribuição de carregamentos realizada pela base. Pode-se utilizar materiais granulares como BGS por exemplo; materiais cimentados como BGTS, dentre outros; assim como a base, o que designa é o Índice de Suporte Califórnia (ISC), cujo valor deve ser superior ao do subleito.
- **Reforço de subleito:** esta camada mostra-se importante quando o subleito não apresentar resistência suficiente para suportar o pavimento. Os materiais utilizados podem ser granulares, cimentados e asfálticos, assim como citados em outras camadas;
- **Subleito:** corresponde ao terreno de fundação preparado para receber o pavimento.

Figura 3: Estrutura típica de pavimento flexível



Fonte: Bernucci et al. (2006)

2.2 REVESTIMENTOS ASFÁLTICOS

A maioria dos revestimentos nos pavimentos brasileiros, são asfálticos, e se apresentam como uma mistura de agregados minerais de várias dimensões, com ligantes asfálticos, na qual, essa deve ser fabricada de forma adequada em suas proporções, para que a execução possa garantir propriedades como impermeabilidade, durabilidade, estabilidade, flexibilidade, resistência à derrapagem, à fadiga, dentre outros; não se esquecendo de levar em consideração os efeitos do clima e tráfego local (BERNUCCI et al, 2006).

Conforme o DNIT (2006), a constituição dos revestimentos asfálticos ou betuminosos é realizada pela associação de agregados e materiais betuminosos. Essa combinação pode ser feita por penetração, que pode ser invertida ou direta, ou por mistura. Na mistura por penetração indireta, o revestimento é executado aplicando o material betuminoso na quantidade de passadas previstas, logo após, se realiza o espalhamento e compressão das camadas de agregados com granulometria apropriada. Já na mistura por penetração direta, o espalhamento e compressão das camadas é realizado primeiro, e em seguida se realiza a aplicação do material betuminoso.

A combinação dos agregados com o ligante asfáltico nos revestimentos betuminosos por mistura, é feita previamente, ou seja, na construção do revestimento, o agregado é pré-envolvido com o material betuminoso, antes de se realizar o espalhamento e a compressão das camadas DNIT (2006).

2.2.1 Agregados

Segundo a NBR 9935:2011, pág.2, agregado é um “ material granular, geralmente inerte, com dimensões e propriedades adequadas para a preparação de argamassa ou concreto”.

Os agregados são extraídos das rochas, as quais se deve conhecer suas propriedades geológicas, pois são de fundamental importância no padrão de desempenho em serviço dos agregados. Deve-se, portanto, reconhecer informações sobre o tipo de rocha de origem do agregado, sua composição mineralógica e química, sua granulagem, seu nível de alteração, sua tendência ao desgaste, abrasão ou ruptura diante do tráfego, além da adesão da sua superfície ao ligante (BERNUCCI et al, 2006).

A utilização de diferentes tipos de agregados em revestimentos asfálticos é enorme, pela diversidade de inúmeras rochas que são passíveis ao emprego em misturas asfálticas. No entanto, as particularidades de cada utilização, inviabilizam muitas das fontes potenciais (BERNUCCI et al, 2006).

Proporcionar estabilidade mecânica aos revestimentos asfálticos, gerar resistência à abrasão superficial, suportar as tensões provenientes do tráfego e transmitir para camadas inferiores são algumas das funções dos agregados em pavimentos rodoviários. Tais finalidades serão maximizadas ou não, dependendo do bom uso e correta aplicação dos agregados.

2.2.1.1 Classificação dos Agregados

Segundo Gouveia (2002), em relação à natureza, os agregados que se destacam como os mais utilizados em concretos asfálticos para pavimentação, são os agregados minerais, os sintéticos, os reciclados e os rejeitos.

Os agregados minerais se dividem em agregados naturais, que são aqueles que ao serem extraídos, não passam por processamentos adicionais; e agregados processados, os quais sofrem algum tipo de tratamento prévio, como o peneiramento, a lavagem e a britagem; antes de sua aplicação nos pavimentos (GOUVEIA, 2002).

Já os agregados sintéticos, não passam por processos de mineração ou extração, estes agregados que geralmente, são subprodutos de indústrias, são incorporados nos concretos asfálticos, para aprimorar determinadas propriedades ou características da mistura, a título de exemplo pode-se citar o xisto e argilas expandidas de baixa densidade que são usadas para melhorar a resistência à derrapagem do concreto asfáltico (GOUVEIA, 2002).

Materiais provenientes da fresagem e reprocessamento da capa asfáltica de pavimentos já existentes, os agregados reciclados podem ser considerados uma importante fonte de elementos para formação de novos pavimentos (GOUVEIA, 2002).

A incorporação de agregados considerados de rejeitos está em crescimento nos revestimentos asfálticos, materiais como borracha de pneus usados, vidros, podem acrescentar melhorias em determinadas características dos revestimentos asfálticos, além de contribuir com o combate aos problemas ambientais decorridos da não reciclagem e descarte desses materiais em locais não adequados (GOUVEIA, 2002).

Quanto ao tamanho dos grãos, os agregados para o uso em misturas asfálticas, podem ser classificados, segundo a norma 031/2006 do DNIT, em graúdos, miúdos e material de enchimento (fíler). Os agregados graúdos, devem ter diâmetro maior que 2,0 mm, isto é, fiquem retidos na peneira de malha nº 10, como a brita, o seixo, etc. Os agregados miúdos são aqueles com dimensões menores que 2,0 mm e maiores que 0,075mm, ou seja, que passam na peneira nº 10 e ficam retidos na de nº 200, como a areia, o pó de brita. Os materiais de enchimento são os que no mínimo 65% das partículas da amostra, passem pela peneira nº 200, como o cimento Portland, a cal hidratada, etc.

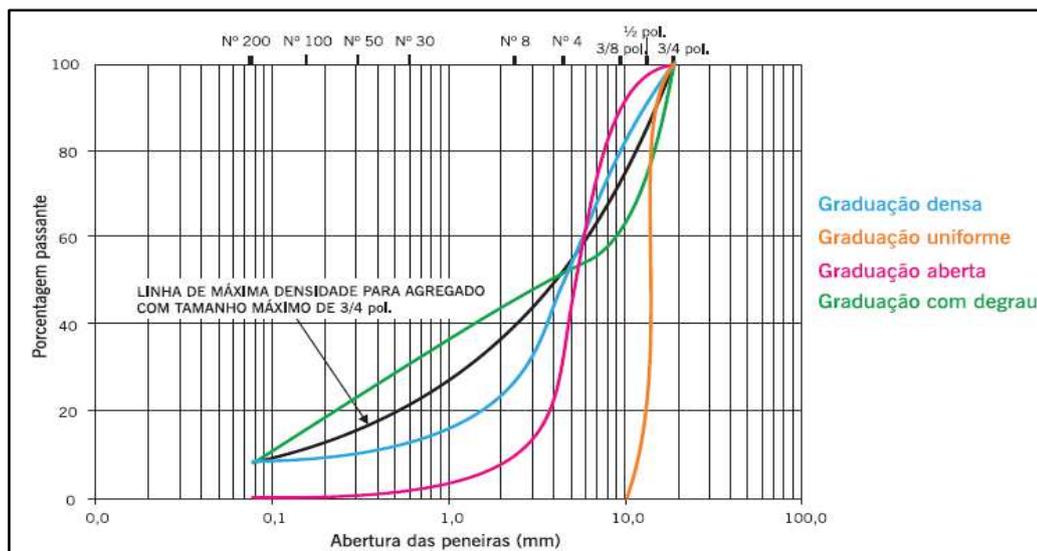
Quanto à distribuição granulométrica dos agregados, é de fundamental importância conhecer as classificações, pois essas interferem no comportamento e nas características dos revestimentos asfálticos. Praticamente quase todas as principais propriedades das misturas asfálticas, como estabilidade, rigidez, durabilidade, permeabilidade, trabalhabilidade, resistência à fadiga e à deformação permanente, entre outras; são influenciadas pela distribuição granulométrica dos grãos (BERNUCCI et al, 2006).

A determinação da distribuição granulométrica dos agregados é definida pela avaliação do peneiramento da amostra seca, do material. Uma vez feito o peneiramento e se conhecendo as porcentagens de material que passam em cada peneira pode-se observar se há ou não concentração de grãos de mesma dimensão, ou se há mais grãos graúdos ou miúdos, permitindo-se categorizar em a amostra em graduações importantíssimas no auxílio da diferenciação de tipos de misturas asfálticas. As graduações mais importantes são grãos (BERNUCCI et al, 2006; DNIT, 2006):

- Agregado de graduação densa: é aquele que mostra uma disposição granulométrica contínua, com a curva granulométrica de material bem graduado, boa quantidade de finos, à qual preenche espaços vazios entre os materiais de maior dimensão;

- Agregado de graduação aberta: é aquele que exibe uma distribuição granulométrica contínua, com a curva granulométrica de material bem graduado, no entanto apresenta pouca quantidade de finos, insuficiente para preencher os vazios;
- Agregado de graduação uniforme: é aquele que possui a maior parte de suas partículas com diâmetros em uma faixa muito reduzida, ou seja, tem praticamente quase todos os grãos com a mesma dimensão e com isso a curva granulométrica se mostra bastante íngreme;
- Agregado com graduação descontínua: é aquele que apresenta pouca quantidade de grãos com dimensões intermediárias, o que forma um patamar na curva granulométrica. Estes agregados quando empregados em misturas asfálticas, devem ser observados e trabalhados de forma conveniente, pela grande propensão a segregação.

Figura 4: Representação das curvas granulométricas das graduações dos agregados



Fonte: Bernucci et al. (2006)

2.2.1.2 Produção dos Agregados

A rocha de origem dos agregados é chamada de rocha matriz ou rocha sã, da qual os agregados herdaram suas principais características físicas, como a resistência à abrasão e a dureza. No entanto, é importante não apenas se obter uma rocha matriz com boas propriedades físicas, no processo de fabricação do agregado deve-se ter a preocupação com cada etapa, uma vez que a exclusão de camadas de rocha fracas ou com algum tipo de contaminação, e a execução da britagem, o qual modifica a forma e a graduação das partículas de agregado, ocasiona efeitos significativos na qualidade do agregado (GOUVEIA, 2002).

Após a extração do minério na jazida, os blocos de rocha são selecionados de acordo com suas dimensões são e levados aos britadores para redução de suas dimensões conforme a granulometria desejada, a britagem se responsabiliza tanto pelo tamanho, quanto pela forma dos fragmentos de minério. O processo é dividido em primário, secundário, terciário e quaternário, até se alcançar a granulometria desejada. A seguir, leva-se o material para o processo de moagem que é chamada de fragmentação fina e constitui a última fase da redução granulométrica do material. Por meio de moinhos de cilindro ou de martelo se reduzem as partículas por combinações de impacto, compressão, abrasão e atrito; à tamanhos que sejam adequados às solicitações especificadas previamente (LOPES, 2014).

2.2.2 Ligante asfáltico

Uma das aplicações mais importantes e mais antigas do asfalto, é o seu emprego na pavimentação, sendo a principal forma de revestimento dos pavimentos, na maioria dos países. No nosso país quase todas as estradas são de revestimento asfáltico, sendo que aproximadamente apenas 5% das estradas pavimentadas que não o utilizam (BERNUCCI et al, 2006).

Essa grande parcela de utilização do asfalto se deve a diversos motivos, seja aquecido ou emulsionado, pode-se destacar a grande união proporcionada aos agregados, pela atuação como ligante, com adição ou não de aditivos, se mostra apto a diversas possibilidades de arranjos de estruturas de agregados, permite também o controle da flexibilidade da mistura, a impermeabilidade, a durabilidade e resistência a ação de sais, ácidos e dos álcalis (BERNUCCI et al, 2006).

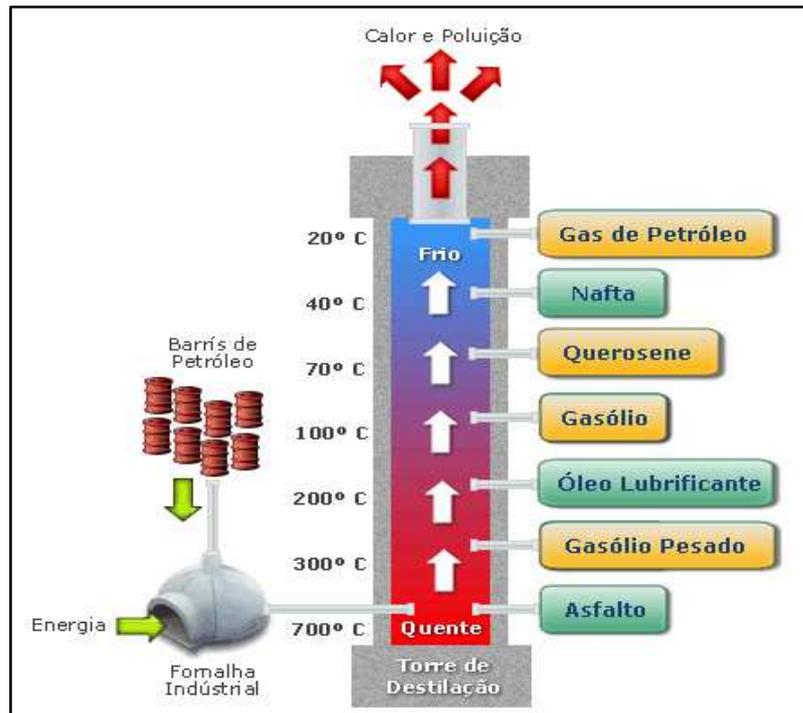
Segundo Senço (2007), betumes são uniões de hidrocarbonetos que são completamente solúveis em bissulfeto de carbono e podem ser produzidos de forma natural, por combustão, ou pelas duas formas de maneira conjunta. Já o asfalto, é considerado um material aglutinante, cujo elemento principal de sua constituição é o betume, pode ser encontrado em jazidas ou pela refinação do petróleo, apresenta uma cor pardo-escura ou negra, e pode variar em relação à sua consistência.

2.2.3 Produção de Asfalto

A destilação do petróleo em torres de destilação, origina diversos produtos, como gasolina, querosene, nafta, diesel, asfalto, dentre outros. Estes produtos, de acordo com as diferenças de temperatura se subdividem em regiões da torre, desde a base até o topo. O

petróleo antes de ser levado para torre de destilação, deve ser desidratado por decantação, por centrifugação ou por tubos de destilação, para que se retire a porcentagem de água em suspensão arrastada por alguns tipos de petróleos parafínicos (SENÇO, 2007).

Figura 5: Destilação Fracionada do Petróleo, numa Torre de Destilação



Fonte: Veronezzi (2011)

2.3 DEFEITOS NOS REVESTIMENTOS ASFÁLTICOS

Os pavimentos normalmente apresentam deterioração tanto funcional quanto estrutural desde sua abertura ao tráfego. A parte estrutural se associa aos danos relacionados à capacidade de carga do pavimento, já a parcela funcional se relaciona com a avaliação da superfície dos pavimentos e como esse estado interfere no conforto ao rolamento (BERNUCCI et al, 2006).

2.3.1 Avaliação da Condição Funcional e Estrutural

Segundo o manual de restauração de pavimentos do DNIT (2005), o desempenho funcional do pavimento trata das condições da qualidade do rolamento, ao qual se mostra como sua principal serventia. Para Gonçalves (1999), o desempenho funcional tem a finalidade de avaliar o pavimento conforme a visão do usuário, observando-se as deficiências que afetam o conforto do rolamento (que pode acarretar custos ao veículo), o tempo de

viagem (pode gerar custos associados em possíveis interrupções no deslocamento) e segurança do usuário (no caso de acidentes de trânsito).

O desempenho estrutural, de acordo com manual de restauração de pavimentos do DNIT (2005) se refere à capacidade de o pavimento não exibir falhas significativas, ou seja, manter sua integridade estrutural. Segundo (BERNUCCI et al, 2006, pág. 442), o desempenho está associado à definição de capacidade de carga, que se conecta de forma direta com o projeto do pavimento e seu dimensionamento, as falhas estruturais que surgem normalmente ocorrem pela repetição de cargas associada às deformações elásticas e permanentes do pavimento.

2.3.2 Deformações nos pavimentos

De acordo com Bernucci et al (2006), cada vez em que o pavimento é solicitado pela aplicação das cargas do tráfego, este se deforma, essa deformação é formada pela deformação elástica e a deformação plástica ou permanente. A deformação elástica é aquela em que o pavimento se deforma e consegue voltar ao seu estado inicial, seu valor é a medida principal para avaliar estruturalmente um pavimento em uso.

Na deformação permanente o pavimento se deforma com a ação do tráfego, no entanto, não há o retorno ao estado inicial que o pavimento se encontrava. Conforme o manual de restauração do DNIT (2005), o afundamento de trilha de roda, a deformação plástica do revestimento e depressões incluem-se neste tipo de deformação e causam dependendo de suas proporções, acréscimos nas irregularidades longitudinais, desconforto no rolamento e riscos à segurança dos usuários, devido ao acúmulo de água. O manual ainda destaca uma tabela que resume as causas e os tipos de deformações permanentes, apresentado no quadro abaixo.

Quadro 1: Causas da deformação permanente

Causa Geral	Causa específica	Exemplo de defeito
Associada com o carregamento	Carregamento concentrado ou em excesso	Fluência plástica (ruptura por cisalhamento)
	Carregamento de longa duração ou estático	Deformações ao longo do tempo (creep)
	Grande número de repetições de carga	Afundamento nas trilhas de roda
Não associada com o carregamento	Subleito constituído de solo expansivo	Inchamento ou empolamento
	Solos compressíveis na fundação do pavimento	Recalque diferencial

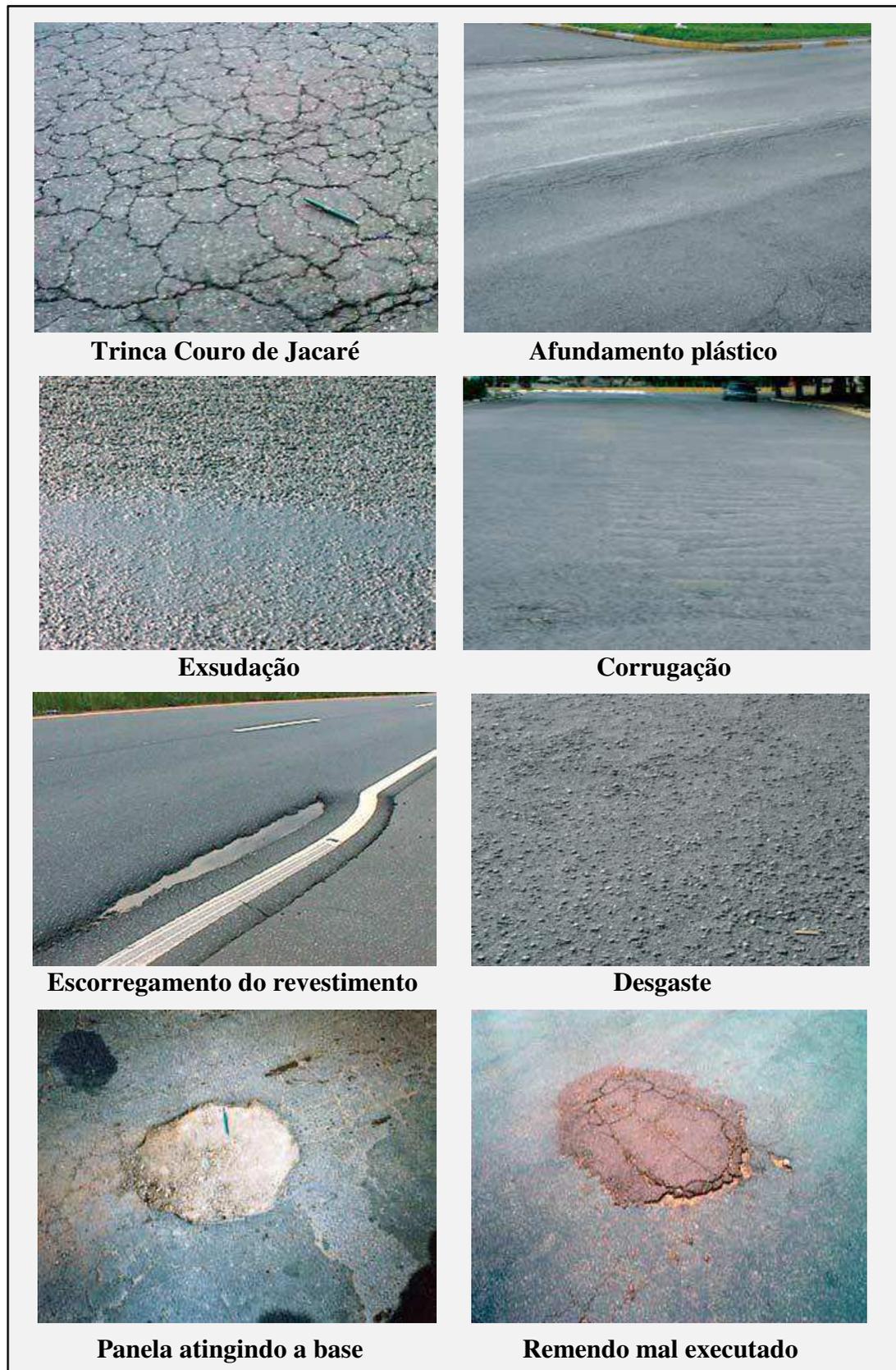
Fonte: DNIT (2005)

2.3.3 Defeitos na superfície dos pavimentos

A norma DNIT 005/2003 classifica os defeitos encontrados nas superfícies dos pavimentos flexíveis; segundo esta, temos:

- Fendas: qualquer descontinuidade na face do pavimento que leve a aberturas, seja de pequeno ou grande porte. As fissuras se definem como fendas que são perceptíveis apenas a menos de 1,50 m de distância e não causam problemas funcionais no pavimento; já as trincas são fendas que se observam com facilidade no pavimento, apresentam maior abertura que as fissuras e podem surgir isoladas (transversal, longitudinal, ou de retração) ou interligadas em outras trincas (tipo “couro de jacaré”, tipo “bloco”);
- Afundamento: se define como uma deformação que se observa na superfície do pavimento, se apresenta como uma depressão, que pode vir acompanhada de elevação das superfícies próximas. Se classifica em afundamento plástico que é causado pela fluência plástica de camadas ou do subleito; e afundamento de consolidação, causado pela consolidação diferencial de camadas ou do subleito; acima de 6m o afundamento é considerado de trilha de roda, seja plástico ou de consolidação;
- Ondulação ou Corrugação: são deformação transversais que se caracterizam pelas ondulações na superfície do pavimento;
- Escorregamento: é definido como um deslocamento que o revestimento sofre em relação à camada subjacente e por consequência surgem fendas em formato de meia lua;
- Exsudação: é determinada como um excesso de ligante no revestimento, apresentado pela movimentação deste entre os vazios do revestimento;
- Desgaste: se caracteriza pelo desprendimento progressivo do agregado do pavimento, deixando um a superfície do revestimento com um aspecto áspero, a causa disso são as forças tangenciais que o tráfego causa no pavimento;
- Panela: é definida como uma cavidade que se apresenta no revestimento e pode ser consequência de diversas causas, como a falta de aderência entre camadas. Dependendo da profundidade da panela, esta pode passar do revestimento, alcançando as camadas inferiores o que poderá causar a desagregação das mesmas;
- Remendo: se mostra como o preenchimento da panela com uma ou mais camadas de pavimento com intuito de se corrigir o desnivelamento e descontinuidade da superfície.

Figura 6: Exemplos de defeitos de pavimentos flexíveis



Fonte: Bernucci et al. (2006)

2.4 PRINCIPAIS TIPOS DE MISTURAS ASFÁLTICAS USINADAS A QUENTE

Pode-se destacar o Concreto Asfáltico (CA, CAUQ ou CBUQ), a Camada Porosa de Atrito (CPA) e o Stone Matrix Asphalt (SMA), como as principais misturas asfálticas usinadas a quente. Neste item serão abordados apenas as características gerais do CA e do CPA, pois deu-se maior destaque ao SMA, tema recorrente desta pesquisa.

2.4.1 Concreto Asfáltico (CA)

Conforme a norma 031/2006 do DNIT, concreto asfáltico é uma mistura formada pela união de agregados graduados, cimento asfáltico e fíler como material de enchimento caso haja necessidade, todos misturados à quente em usina adequada, prosseguindo-se com o espalhamento e compactação.

Para Bernucci et al (2006), é uma das misturas asfálticas mais empregadas no Brasil, conhecida também como Concreto Asfáltico Usinado à Quente (CAUQ) e Concreto Betuminoso Usinado à Quente (CBUQ). É o produto de uma relação convenientemente proporcionada de agregados de várias dimensões e cimento asfáltico, aquecidos segundo temperaturas previamente escolhidas. Pode ser fabricado com CAP convencional, ou de forma especial, seja com adição de polímero ou borracha no ligante ou com asfalto duro.

A mistura possui graduação densa, ou bem-graduada (ver item 2.2.1.1), o que possibilita se criar um arranjo de partículas que não necessitam de muito ligante (4,5 a 6,0% normalmente) para encobrir os agregados ou preencher os vazios. O volume de vazios após a compactação de ser entre 3 e 5% no caso de camadas de rolamento e 4 a 6% em camadas de ligação (BERNUCCI et al, 2006).

É uma ótima opção de mistura para a maioria dos casos, e pode ser empregada para qualquer volume de tráfego, desde que seja dimensionada de forma adequada. No entanto, suas propriedades são muito sensíveis à variação do teor de ligante asfáltico, mesmo uma variação positiva que esteja dentro do admissível, pode ao sair da usina e ser executada, gerar problemas futuros de deformação permanente por fluência e/ou exsudação (BERNUCCI et al, 2006).

Figura 7: Restauração com capa asfáltica em Concreto Betuminoso Usinado a Quente



Fonte: AGETOP (2014)

2.4.2 Camada Porosa de Atrito (CPA)

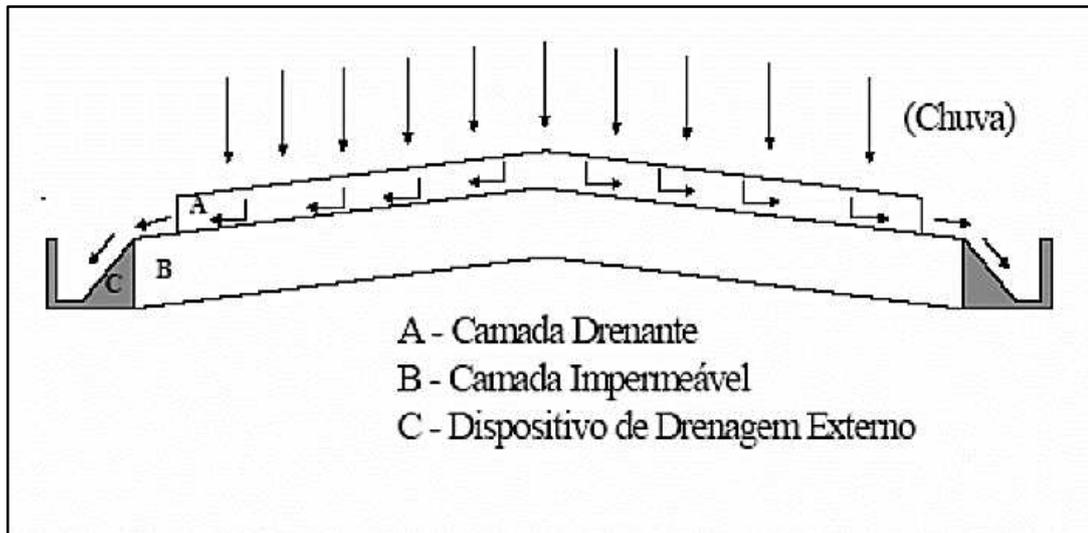
A camada porosa de atrito é um revestimento de concreto asfáltico usinado a quente, fabricado com um alto volume de vazios de ar, cerca de 18 a 25%, isto possibilita a infiltração, e o deslocamento das águas provenientes da chuva na camada do pavimento sendo direcionadas às laterais do pavimento por conta da inclinação da pista (SANTOS, 2004).

O alto volume de vazios, de acordo com Bernucci et al (2006), se deve à graduação aberta dos agregados, pois nesta, como dito anteriormente se tem uma curva granulométrica uniforme, com agregados quase tão somente de uma mesma dimensão, o que gera muitos vazios, não preenchidos pela pequena quantidade de material fino, assim a mistura permite a entrada de água e possibilita a percolação no seu interior.

O mais importante são os resultados que ela causa, como a redução da espessura da lâmina d'água na face da camada de rolamento, e em consequência disso, quando um veículo realizar a frenagem a distância percorrida será menor; a redução do spray resultante do borrfifo de água pelos pneus, aumentando a distância visível dos usuários; a redução do ruído ao rolamento; e redução da reflexão da luz dos faróis noturno. Com isso, pode-se reduzir a quantidade de acidentes em dias de chuva (BERNUCCI et al, 2006).

Na Europa, vem sendo realizado a limpeza desses revestimentos drenantes, pois depois de um certo período de uso, os vazios começam a ser preenchidos por impurezas, reduzindo a permeabilidade desejada, logo a manutenção é imprescindível para garantir o desempenho do revestimento (BERNUCCI et al, 2006).

Figura 8: Esquema de Funcionamento da Camada Porosa de Atrito



Fonte: Veronezzi (2011)

2.5 STONE MATRIX ASPHALT (SMA)

2.5.1 Breve Histórico do SMA

A mistura asfáltica que tem por sigla SMA tem origem na Alemanha e tem por significado original a palavra Splittmastixasphalt, posteriormente foi traduzida para o inglês para Stone Matrix Asphalt, terminologia escolhida pelo Estados Unidos e mais tarde pelo Brasil. Seu significado em português é matriz pétreo asfáltica, no entanto para se evitar confusões de conceitos e especificações se adotou a sigla original (BERNUCCI et al, 2006).

Na década de 60, o engenheiro alemão Dr. Zichner, que era gerente do Laboratório Central de Construções Rodoviárias de Strabag Bau AG, elaborou essa mistura, no intuito de resolver os problemas causados nos pavimentos, pelos veículos que comumente por conta da precipitação da neve habitual devido ao clima frio, utilizavam pregos nos pneus (RAMOS, 2012).

Naquela época, utilizavam a mistura chamada de Gussasphalt, que pode se traduzir como asfalto mástique, e um concreto asfáltico com baixo teor de agregado graúdo, contudo, estas misturas se desgastavam muito rápido com pregos dos pneus e não eram suficientemente fortes para concluir a vida útil desejada para o revestimento asfáltico. Logo, com a busca pela redução dos gastos com manutenção e restauração, aumentou-se a demanda por uma mistura mais forte, que suportasse o tráfego de pneu com pregos (RAMOS, 2012).

Segundo Blazejowski (2011), o Dr. Zichner acreditava que o agregado graúdo tinha maior durabilidade em relação ao esmagamento, o que poderia garantir uma maior

resistência à camada de rolamento. Desta forma, ele tinha mais componentes no preparo das misturas, levando-se em conta que um elevado teor de mástique e ligante produzem uma mistura com maior vida útil. Logo, a ideia do SMA seria a criação de uma mistura com um forte esqueleto de agregados graúdos, e preenchimento dos vazios por um mástique.

Conforme Lanchas (1999, apud MOURÃO, 2003), a primeira solução foi um tratamento com mástique composto por 40 a 50% de areia com graduação de 0 a 2mm, 30 a 35% de fíler e 25% de ligante. Este tratamento com mástique, fornecia ao pavimento uma grande resistência ao desgaste, no entanto a aplicação era manual e apresentava assim desvantagens como limitação na capacidade de uso e não-homogeneidade. Devido à essas desvantagens criou-se uma nova mistura, esta apresentava 75% de pedras de 5 a 8 mm, 15% de areia com 0 a 2 mm, 10% de fíler e 7% de betume. O problema apresentado agora, era o escorrimento do ligante da mistura. Para se evitar esse escorrimento começou-se a adicionar fibras para estabilizar a mistura; assim, em julho de 1968 nasceu o SMA e seu primeiro recobrimento foi aplicado na rua Freiligrath de Wilhelmshaven, Alemanha.

2.5.2 Características gerais do SMA

O SMA é um revestimento asfáltico usinado a quente, e tem por objetivo aumentar o contato entre os agregados graúdos, o que gera maior interação entre os grãos; uma das características marcantes desta mistura é a grande porcentagem de agregados graúdos, o que resulta em um grande volume de vazios entre os grãos. Para se preencher esses vazios usa-se o mástique asfáltico que é uma mistura de areia, fíler, ligante asfáltico e fibras. (BERNUCCI et al, 2006).

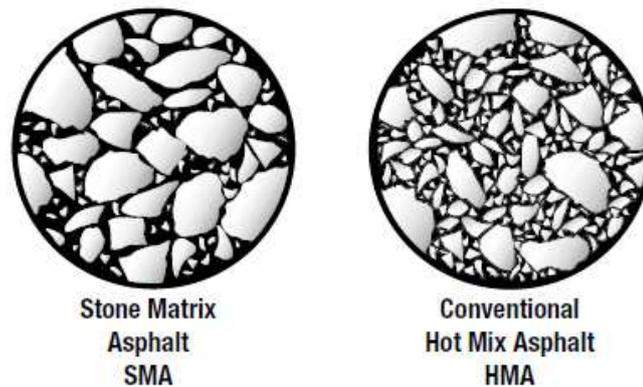
Com isso, a mistura passa a apresentar apenas carência de agregados intermediários; isto se deve à graduação dessa mistura, que é considerada descontínua (ver item 2.2.1.1). Segundo (RAMOS, 2012), a graduação descontínua apresenta uma curva granulométrica com uma maior proporção de grãos de maiores dimensões e de materiais finos, do que com grãos intermediários de forma que gera uma curva descontínua em certas peneiras. O objetivo é que a mistura tenha uma maior resistência à deformação permanente, pelo maior contato entre os agregados graúdos.

A mistura SMA também é caracterizada pelo alto teor de ligante, que gira em torno de 6 a 7,5%, por apresentar certa impermeabilidade, devido ao volume de vazios que varia entre 4 e 6%; a espessura da camada de aplicação normalmente varia entre 1,5 e 7 cm, dependendo da faixa granulométrica (BERNUCCI et al, 2006).

Na produção, o SMA se diferencia das misturas densas, pela grande quantidade

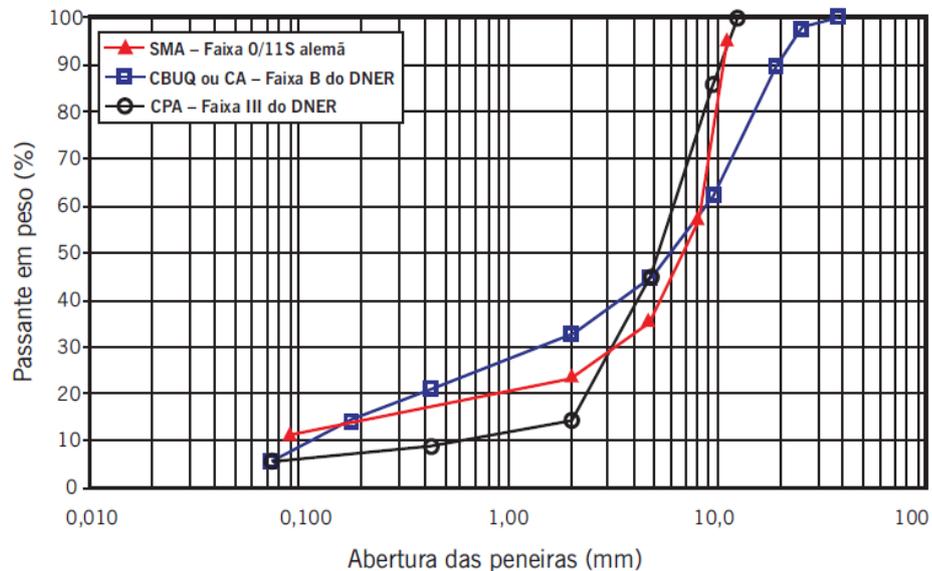
de fíler adicionada aos agregados, que passam na peneira N° 200, mais ou menos de 8 a 12% em peso, o que solicita a necessidade de um sistema com dosador adicional, na fabricação em usinas. A necessidade de controle de temperaturas, deve ser a mesma, como em todas as misturas usinadas a quente, talvez até redobrada pela preocupação com o escorrimento do ligante, durante as etapas de usinagem e transporte (RAMOS, 2012).

Figura 9: Comparação entre misturas SMA e misturas densas convencionais



Fonte: NAPA (2002)

Figura 10: Curvas granulométricas de diferentes misturas asfálticas a quente

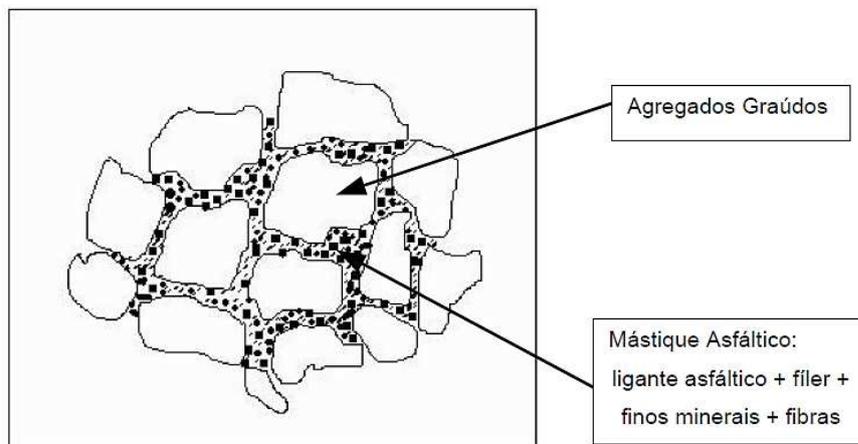


Fonte: Bernucci et al. (2006)

2.5.3 Materiais que compõem a mistura

Segundo Blazejowski (2011), para uma melhor compreensão da mistura SMA, pode-se dividi-la em três componentes principais: Esqueleto mineral formado dos agregados graúdos, mástique da mistura (ligante, filler, agregado miúdo e estabilizador) e os vazios da mistura.

Figura 11: Detalhamento do esqueleto mineral da mistura SMA



Fonte: Mourão (2003)

2.5.3.1 Agregados Graúdos

Conforme o Instituto do Asfalto (2001, apud MOURÃO, 2003), os agregados minerais são responsáveis por 90 a 95 % do peso das misturas e em 75 a 85% do volume das misturas asfálticas. Estes são essencialmente encarregados de suportar as cargas dos pavimentos, mostrando assim sua enorme importância no desempenho das misturas asfálticas.

No uso de misturas SMA, Neves Filho (2004) comenta que na maioria dos países da Europa se exige que os agregados sejam 100% britados, fala também que a recomendação é que se usem agregados britados com alta qualidade, sempre virgens, ou seja, que não sejam produtos de reciclagem de outros pavimentos.

A norma AASTHO MP8-01 exige para misturas asfálticas SMA, o uso material granular 100% britado e que em pelo menos 90% destes, hajam duas faces britadas. Além do mais é requerido que do material utilizado, os grãos achatados e alongados sejam no máximo 20% na relação 3:1, apresente uma porcentagem de no máximo 30% para o ensaio de Abrasão “Los Angeles” e de 2% para a absorção (NAPA, 2002).

De acordo com Bernucci et al (2006), a primeira especificação de misturas SMA foi a alemã e mostrava quatro tipos de SMA, que eram denominados de 0/11S; 0/8S; 0/8 e 0/5, sendo que este último algarismo se refere ao diâmetro nominal máximo do agregado (onde até 10% deveriam ficar retidos na peneira com esse diâmetro). As faixas 0/11S e 0/8S eram dedicadas à tráfegos pesados ou solicitações especiais.

Figura 12: Faixas granulométricas dos agregados segundo especificação alemã

Peneira	Faixas			
	Porcentagem em massa			
	SMA 0/11S	SMA 0/8S	SMA 0/8	SMA 0/5
< 0,09mm	9-13	10-13	8-13	8-13
> 2mm	73-80	73-80	70-80	60-70
> 5mm	60-70	55-70	45-70	< 10
> 8mm	> 40	< 10	< 10	-
> 11,2mm	< 10	-	-	-

Fonte: Bernucci, et al (2006)

A União europeia também sugeriu faixas de granulometria, tanto de diâmetros menores que a norma alemã como 4 e 6mm, como com diâmetros maiores, como 16, 19 e 25mm (BERNUCCI et al, 2006).

A especificação norte americana é colocada pela norma AASHTO MP8-01 que divide em 5 faixas granulométricas (4,75; 9,5; 12,5; 19; 25 mm), sendo a recomendação utilizar as faixas entre 9,5 e 19 mm, por conta de que as faixas de 4,5 e 25 mm não refletem prática típica para aplicações de SMA (NAPA, 2002).

Quadro 2: Faixas granulométricas dos agregados segundo AASHTO MP8-01

Abert. das Peneiras	25 mm		19 mm		12,5 mm		9,5 mm		4,75 mm	
	Lim. Inf.	Lim. Sup.								
37,5mm	100%	100%	–	–	–	–	–	–	–	–
25,0mm	90%	100%	100%	100%	–	–	–	–	–	–
19,0mm	30%	86%	90%	100%	100%	100%	–	–	–	–
12,5mm	26%	63%	50%	74%	90%	100%	100%	100%	–	–
9,5mm	24%	52%	25%	60%	26%	78%	90%	100%	100%	100%
4,75mm	20%	28%	20%	28%	20%	28%	26%	60%	90%	100%
2,36mm	16%	24%	16%	24%	16%	24%	20%	28%	28%	65%
1,18mm	13%	21%	13%	21%	13%	21%	13%	21%	22%	36%
0,6mm	12%	18%	12%	18%	12%	18%	12%	18%	18%	28%
0,3mm	12%	15%	12%	15%	12%	15%	12%	15%	15%	22%
0,075mm	8%	10%	8%	10%	8%	10%	8%	10%	12%	15%

Fonte: Adaptado de NAPA (2002)

2.5.3.2 Mástique da mistura

Segundo Bernucci et al (2006), o mástique é constituído de agregado miúdo, material de enchimento (fíler), ligante asfáltico e fibras. E essa associação tem como objetivo preencher os vazios da mistura.

Segundo Blazejowski (2011), o mástique é o segundo componente em questão de quantidade na mistura, cerca de 20 a 25% do peso e 30 a 35% do volume. Os agregados graúdos apresentam em média 40 a 45% de vazios, antes de serem misturados ao mástique, caindo em seguida para valores entre 3 e 5% de volume de espaço vazio. Além de preenchimento de vazios, destaca-se ao mástique a responsabilidade de ligar os grãos do agregado graúdo e lubrificá-los para a adequada compactação, aumentar a durabilidade e resistência a umidade e contaminação, além de suportar as tensões causadas pelos carregamentos e variação de temperatura.

2.5.3.2.1 Agregados Miúdos

Segundo Blazejowski (2011), os agregados miúdos devem preencher os vazios entre os grãos do agregado graúdo e favorecer o intertravamento, estes se mostram como os

grãos passivos da mistura. No entanto, a rugosidade de suas superfícies é de suma importância, pois evita o enfraquecimento da mistura asfáltica.

A AASHTO MP8-01 requisita que os agregados miúdos não apresentem nenhuma plasticidade, estes, devem apresentar sanidade ao sulfato de sódio máxima de 15% e 20% ao sulfato de magnésio; devem também apresentar uma angularidade de no mínimo 45% e um limite de liquidez de no máximo 25% (NAPA, 2002).

2.5.3.2.2 Ligante

As misturas SMA apresentam um teor de ligante entre 1 e 1,5% a mais do que misturas de concreto asfáltico convencionais, o que faz com que os agregados possuam uma película de ligante mais espessa, evitando melhor o desgaste gerado pelo atrito entre os agregados (NEVES FILHO, 2004).

Como ligante da mistura, podem ser utilizados, os cimentos asfálticos de petróleo (CAP) ou os asfaltos modificados por polímeros (AMP). O CAP manifesta propriedades aglutinantes e impermeabilizantes, possui características de flexibilidade, durabilidade e grande resistência à ação da maior parte dos produtos inorgânicos. Quanto aos ligantes modificados por polímeros, notam-se características bem interessantes, apresentando certas vantagens, como o melhoramento da coesão e da adesividade, a diminuição da deformação permanente e crescimento da vida de fadiga, além de melhoramento da preservação da macrotextura durante a vida de serviço (MOURÃO, 2003).

Conforme a EAPA (1998, apud NEVES FILHO, 2004), na Europa normalmente utilizam o ligante B60 que possui penetração entre 50 e 70 décimos de mm e o B80 (penetração entre 70 e 100 décimos de mm) para vias com tráfego leve. Já para rodovias de tráfego pesado se exigem ou pelo menos aconselham o uso de ligantes modificados. Existem países, como por exemplo, Itália e Portugal que exigem de forma obrigatória o uso de polímeros em misturas SMA.

A norma americana AASHTO MP8-01 não apresenta especificações quanto ao ligante, sendo este avaliado pelas normas do país de origem. No Brasil o CAP é verificado conforme as exigências da Nova Especificação Brasileira de Cimento Asfáltico de Petróleo (ANP, 2005).

2.5.3.2.3 *Material de enchimento (Fíler)*

Segundo a Norma DNER-ME 367/97 o fíler um material mineral inerte comparado aos outros componentes da mistura asfáltica, se apresenta finamente dividido e deve passar na peneira de N° 200 (0,075mm) no mínimo 65% da amostra. Em misturas asfálticas pode ser utilizado como material de enchimento o Cimento Portland, o pó calcário, a cal hidratada, o pó de pedra, a cinza volante ou outro material que tenha sido preparado de forma conveniente e sigam as características apresentadas.

O fíler é usado para preencher os vazios entre os agregados graúdos e miúdos, contribuindo para o fechamento da mistura, alterando assim a trabalhabilidade, a resistência à ação da água e a resistência ao envelhecimento. Devido às características da sua superfície e o pequeno tamanho de suas partículas, o fíler tem parte ativa nas propriedades da interface fíler/ligante asfáltico, mostrando assim que causa modificações na mistura e não se qualifica apenas como material inerte (BARDINI; KLINSKY; FERNANDES JR; 2009).

De acordo com Motta e Leite (2000, apud MOURÃO, 2003), o fíler pode seguir duas alternativas de atuação em misturas densas, na qual as partículas de maior dimensão farão parte do agregado mineral preenchendo os interstícios dos agregados graúdos, já as partículas menores irão se misturar com o ligante asfáltico, fazendo com que este aumente sua consistência, provocando cimentação das partículas maiores.

2.5.3.2.4 *Agente Estabilizador (Fibras)*

A adição de fibras na mistura SMA é realizada com o objetivo de se evitar o escorrimento do ligante durante todo o processo de construção, que vai desde a produção até a aplicação, principalmente no transporte. Geralmente, as fibras não modificam o desempenho da mistura após a compactação, mas são importantes no aumento da durabilidade da mistura, pois com sua aplicação pode-se aumentar mais ainda o teor de ligante, aumentando a película que envolve os agregados retardando processos como oxidação, penetração de umidade e desagregação dos agregados (NEVES FILHO, 2004).

Figura 13: Mistura SMA sem fibra e com fibra



Fonte: Tuchumantel jr (2013)

Segundo Blazejowski (2011), os estabilizadores que absorvem o ligante asfáltico podem ser de vários tipos, diferindo apenas no poder de absorção, como exemplos ele cita:

- Fibras de celulose, (as mais usadas);
- Fibras de pseudo-celulose, fabricadas com papel inutilizado;
- Fibras minerais, produzidas pela união de alguns tipos de rochas (como lã de rocha);
- Celulose-mineral, uma combinação de celulose com fibras minerais;
- Celulose-polímero, um composto formado de celulose com variados tipos de polímeros e em diversos teores;
- Celulose-cera, uma combinação de celulose com ceras sintéticas, que não só estabilizam a mistura, como modificam a viscosidade do ligante asfáltico;
- Têxteis, através do processamento e quebra de rejeitos têxteis;
- Plásticas, como o polipropileno, por exemplo;
- Fibra de vidro, em forma de fios (como lã de vidro);
- Outros tipos, como por exemplo, o pó de couro, fibras da casca do coco.

Segundo Beligni et al (2000, apud MOURÃO, 2003) as fibras de celulose desempenham uma ação de microarmadura (reticulado tridimensional) que em conjunto com os polímeros presentes no ligante betuminoso (AMP) aumentam a coesão do sistema. As fibras também possibilitam a o uso da granulometria descontínua que aumenta a macrotextura do revestimento, aprimorando as características mecânicas de drenagem superficial e a aderência entre os pneus e o pavimento, reduzindo os efeitos de aquaplanagem.

Conforme Blazejowski (2011), as fibras além de apresentarem diferentes

absorções de ligante, possuem também diferentes densidades e por consequência, a adição de diferentes volumes na mistura SMA. Fibras minerais que apresentam altas densidade necessitam também de uma alta adição na mistura, normalmente na ordem de 0,4 a 0,6% em massa. Além do mais caso o estabilizador não funcione de forma adequada, deve-se aumentar sua quantidade na mistura, devendo diminuir o escorrimento do ligante, no entanto deve-se levar em consideração que o aumento elevado da porcentagem de fibra pode afetar a trabalhabilidade da mistura; as fibras plásticas são um exemplo disso.

Abaixo segue uma tabela segundo Pank (1995), com a especificação finlandesa de recomendações para adição de fibras pelas porcentagens em relação ao peso total da mistura, conforme seu tipo.

Quadro 3: Recomendações Finlandesas para adição de fibras conforme sua natureza

TIPO DE FIBRA	FAIXA RECOMENDADA DE FIBRA NA MISTURA (%)
Fibra de Celulose	0,3 - 0,5
Fibra Mineral	0,7 - 0,9
Fibra de Vidro	0,4 - 0,6

Fonte: Adaptado de Pank (1995)

As fibras de celulose podem ser adicionadas na mistura como: fibras soltas, nas quais se mostram em formas irregulares formada de fios de celulose; fibras peletizadas sem ligante, que se apresentam como produtos granulados prensados, para se formar grânulos que não necessitem de ligante para envolvê-las; e fibras peletizadas com ligante, que se mostram como granulados cilíndricos de 3 a 4mm de diâmetro e 3 a 5mm de comprimento feitos de fios de celulose encobertos com ligante asfáltico ou outro tipo de agente, como cera ou plástico (RAMOS, 2012).

2.5.4 Especificação e Aplicação da mistura

Seguem abaixo, a figuras 14 contendo as especificações alemã para misturas SMA e figura 15, conforme Bernucci et al (2006) a especificação americana contida na AASHTO MP8-01:

Figura 14: Especificação alemã para misturas SMA

Características e requisitos				
Tipo de asfalto ¹	B65 ou PmB45	B65 ou PmB45	B 80	B80 ou B200
Teor de asfalto na mistura, % em peso	> 6,5	> 7,0	> 7,0	> 7,2
Fibras na mistura, % em peso	0,3 a 1,5			
Dosagem	Marshall (50 golpes por face)			
Temperatura de compactação, °C	135°C ± 5°C (para PmB deve ser 145°C ± 5°C)			
Volume de vazios, %	3,0–4,0	3,0–4,0	2,0–4,0	2,0–4,0
Camada de rolamento				
Espessura, mm	35–40	30–40	20–40	15–30
Ou consumo, kg/m ²	85–100	70–100	45–100	35–75
Camada de nivelamento				
Espessura, mm	25–50	20–40	–	–
Ou consumo, kg/m ²	60–125	45–100	–	–
Grau de compactação	> 97 %			
Volume de vazios da camada compactada	< 6,0 %			

Fonte: Bernucci, et al (2006)

Figura 15: Especificações da mistura SMA para a AASHTO MP8-01

Propriedade	Requisito para corpos-de-prova compactados no equipamento giratório – Superpave
Volume de vazios, %	4,0 ^a
VAM (vazios no agregado mineral), % mín.	17
VCAmix ^b	< VCA _{drc} ^b
Estabilidade Marshall, N, mín.	6.200 ^c
RRT – Resistência à tração retida (AASHTO T 283), % mín.	70
Teste de escorrimento (<i>draindown</i>) na temperatura de produção ^d , % em peso máx.	0,30
Teor de asfalto na mistura, % mín.	6,0

Fonte: Bernucci, et al (2006)

Conforme Bernucci et al (2006), a mistura SMA atualmente pode ser aplicada em vias com alta frequência de caminhões, interseções, áreas de carregamento e descarregamento de cargas, rampas, pontes, paradas de ônibus, faixa de ônibus, pistas de aeroporto,

estacionamentos, portos.

Ramos (2012) fala que considerando a grande quantidade de aeroportos espalhados pelo mundo, o uso de SMA em suas pistas se restringe a poucos, onde a maioria se encontra na Europa, Austrália e China, sendo que a China e a Noruega são os que mais se destacam. O autor cita diversos aeroportos do mundo, por exemplo o aeroporto de Molde e o de Oslo Gardermoen na Noruega, os aeroportos de Antwerp e de Ostend na Bélgica, o aeroporto de Frankfurt na Alemanha, o aeroporto de Guadalajara no México, o aeroporto internacional de Beijing na China, entre outros.

No Brasil, segundo Beligni et al (2000, apud BERNUCCI et al, 2006), inicialmente se construiu a pista do autódromo de Interlagos em São Paulo em fevereiro de 2000; Conforme Reis et al (2002, apud BERNUCCI et al, 2006), construiu-se em agosto de 2001, um trecho experimental de SMA na curva mais fechada e perigosa da Via Anchieta, rodovia que faz ligação entre São Paulo e Santos, dando resultados muito positivos, mostrando superioridade no comportamento funcional e estrutural em relação à outros revestimentos asfálticos anteriormente empregados.

A partir disso, Bernucci et al (2006) relata que outros trechos de vias estão utilizando misturas SMA, executando ora graduações alemãs, ora americanas, os autores destacam que as mais recentes são em rodovias dos Estados de São Paulo e Minas Gerais, além da utilização em vias urbanas em São Paulo, Rio de Janeiro e Salvador.

2.5.5 Vantagens e Desvantagens da mistura

Segundo Bernucci et al (2006), no desempenho do SMA, as principais características notadas são:

- Boa estabilidade a elevadas temperaturas;
- Boa flexibilidade a baixas temperaturas;
- Grande resistência ao desgaste;
- Boa resistência a derrapagem devido a macrotextura da superfície de rolamento;
- Redução do efeito spray ou cortina de água durante a chuva;
- Diminuição do nível de ruído ao rolamento.

No entanto, mesmo possuindo características muito positivas, a mistura possui também algumas particularidades negativas. Segundo Blazejowski (2011):

- Baixa resistência à derrapagem inicial – devido à fina espessura de asfalto sobre os agregados na superfície, a não ser que se realize a aplicação de “*gritting*”, que consiste na aplicação de uma taxa de areia graduada sobre o pavimento durante a segunda passagem do rolo na compactação.
- Custo inicial maior, se comparado às misturas densas tradicionais – por conta do elevado teor de ligante asfáltico (>6%), fíler (~10%) e fibra estabilizante, no entanto a maior vida de serviço, o torna viável;
- Risco de aparecimento de diferentes tipos de exsudação – devido a falhas ou variações do projeto, produção e lançamento da mistura.

3 MATERIAIS E METODOLOGIA

A abordagem deste estudo é qualitativa explicativa e se estabelece de maneira experimental, se baseia tanto na pesquisa de bibliografias relacionadas ao tema, quanto por meio da sensibilidade e observação de experiências empíricas, desejando-se atingir os objetivos que foram propostos.

O foco deste trabalho é a análise da utilização das fibras do babaçu adicionadas ao revestimento asfáltico SMA (Stone Matrix Asphalt), com o objetivo de se evitar o escorrimento do CAP 50/70, ligante asfáltico que foi utilizado, e verificar se esta mistura conseguiu satisfazer os parâmetros das propriedades estabelecidas pelas normas vigentes.

Primeiramente realizou-se uma pesquisa bibliográfica para dar alicerce ao tema estudado, como por exemplo: conceito de pavimento, tipos de pavimentos, revestimentos asfálticos e seus tipos, características do revestimento asfáltico SMA, locais onde foram executados esse revestimento, etc.

Concluída a revisão bibliográfica, foram definidos os materiais necessários à composição do revestimento estudado. Os agregados graúdos e miúdos foram fornecidos pela Construtora Brasileira e Mineradora Ltda. (CBEMI), o ligante asfáltico CAP 50/70 foi concedido pela usina de asfalto da prefeitura de São Luís, o material de enchimento (cimento Portland) foi suprido pelo Laboratório de Concreto e Materiais (LABCOM).

As fibras do coco babaçu se encontravam no depósito do laboratório de solos e pavimentação da Universidade Estadual do Maranhão, uma vez que foram utilizadas em outras pesquisas. Estas, foram obtidas através da empresa Florestas Brasileiras S.A, parceira da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, unidade Maranhão (EMBRAPA-MA) localizada no município de Itapecuru-Mirim, a 117 quilômetros de São Luís.

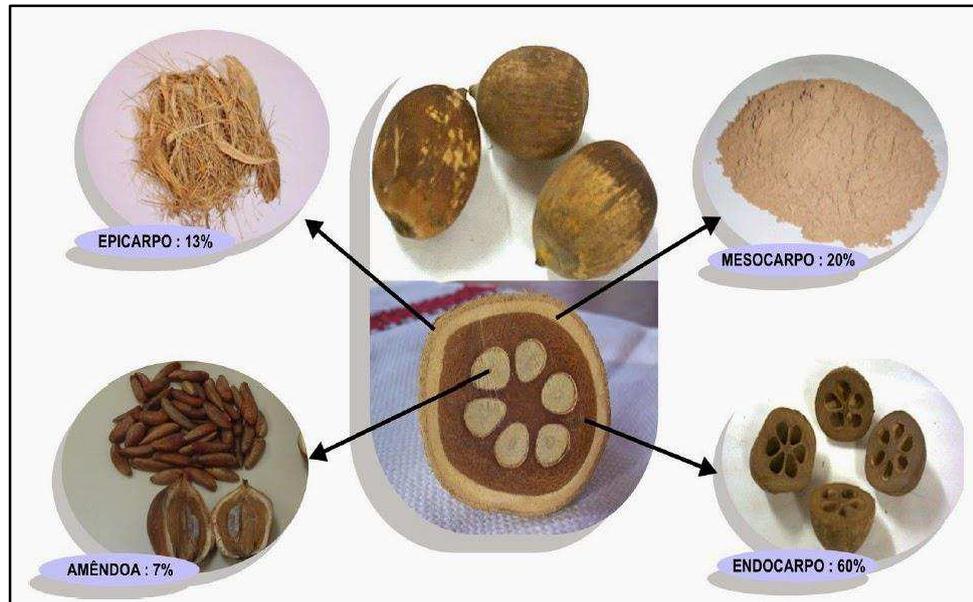
Obtidos os materiais, se iniciou no Laboratório de Solos e Pavimentação (LSP) os ensaios de caracterização dos materiais, que serão destacados neste capítulo, seguidos do enquadramento em faixa granulométrica da AASHTO MP8-01, composição do traço e ensaios na mistura asfáltica resultante.

3.1 FIBRAS DE BABAÇU

Como comentado acima, as fibras de babaçu foram fornecidas pela empresa Florestas Brasileiras S.A, parceira da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, unidade Maranhão (EMBRAPA-MA). Esta fibra, é proveniente da parte externa fruto do babaçu, chamada de epicarpo. A figura abaixo, mostra o fruto do babaçu, a seção transversal deste, e

possíveis utilizações que cada componente do fruto pode possibilitar.

Figura 16: Componentes do fruto do babaçu e algumas de suas possíveis utilizações



Fonte: UFPI (2015)

Segundo a Ecycle (2015) a EMBRAPA, Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária vem apoiando o desenvolvimento de uma tecnologia para aproveitamento da casca do coco verde na produção de colchões, palmilhas e fibras vegetais. As cascas são trituradas por equipamentos feitas especificamente para essa finalidade e depois prensadas, para perderem a umidade.

O procedimento utilizado para a fabricação da fibra do epicarpo do babaçu, pode seguir o mesmo do comentado acima.

Figura 17: Amostra de fibras do epicarpo do fruto do babaçu utilizadas na pesquisa



Fonte: Autor (2016)

Nestas fibras foram avaliados alguns parâmetros, como o comprimento médio, diâmetro e sua densidade. O método de definição utilizado para encontrar a densidade da fibra, foi com o uso do frasco Le Chatelier, o comprimento médio e o diâmetro foram coletados de outras pesquisas do Laboratório de Solos e Pavimentação da UEMA, que utilizaram fibra babaçu. Abaixo segue um quadro com os parâmetros encontrados.

Quadro 4: Amostra de fibras do epicarpo do babaçu utilizadas na pesquisa

PARÂMETROS AVALIADOS	VALORES ENCONTRADOS
Comprimento médio (mm)	5,00
Diâmetro (mm)	0,40
Densidade (g/cm³)	1,254

Fonte: Autor (2016)

3.1.1 Observações iniciais quanto a quantidade adicionada de fibras nos CP's

Em relação à quantidade de fibra de babaçu a serem adicionadas nos corpos de prova, buscou-se primeiramente seguir o quadro 3, com a faixa de recomendação finlandesa para adição de fibras. Utilizou-se a faixa para fibras de celulose, que recomenda a adição de 0,3 a 0,5% em relação ao peso total da mistura.

Iniciou-se a fabricação de corpos de prova com 6,0% de CAP e 0,5% de fibras. No entanto, no ato da mistura, já se verificou que esta quantidade não evitaria o escorrimento do ligante dos CP's. Feita a mistura, levou-se a massa para a compactação, com aplicação de 50 golpes em cada face do CP. Após a compactação, constatou-se que o corpo de prova começou a se fragmentar e desagregar, não mantendo sua forma (ver figura 18). Concluiu-se então, que a quantidade de fibras era insuficiente para possibilitar a compactação e contenção do escorrimento dos corpos de prova.

Com isso, foi essencial o aumento da adição de fibras de babaçu na mistura, procurou-se então avaliar a quantidade necessária que promovesse um escorrimento de no mínimo 0,3% da massa total de um CP, adicionando-se à fixos 6,0% de CAP, fibras nas porcentagens de 1, 2, 3, 4 e 5% da massa total da mistura, e para comprovação do escorrimento foi realizado o ensaio descrito no item 3.2.3.1.

Além do mais, as fibras eram acrescentadas soltas e verificou-se que estas apresentavam grande sensibilidade ao calor e quando adicionadas junta aos agregados para

aquecimento, parte dessas se queimavam, então foi decidido acrescentá-las após a mistura do agregado com o ligante, conforme a figura 19, abaixo.

Figura 18: Corpo de prova com 0,5% de fibra de babaçu, após a compactação.



Fonte: Autor (2016)

Figura 19: Momento da adição das fibras na mistura



Fonte: Autor (2016)

Idealizou-se então, encontrar a porcentagem de fibras que suprissem às exigências da norma americana AASHTO MP8-01.

3.2 ENSAIOS LABORATORIAIS NOS AGREGADOS

Os materiais empregados nesta pesquisa foram: brita 1 e brita 0 (agregados graúdos), pó de brita e areia (agregados miúdos), fíler (material de enchimento), fibras de babaçu e CAP 50/70 como ligante asfáltico.

3.2.1 Ensaios nos Agregados Minerais

3.2.1.1 Granulometria dos Agregados

A granulometria dos materiais foi realizada conforme a norma rodoviária DNER-ME 083/98, que prescreve o procedimento adequado para realização do peneiramento dos agregados. Este ensaio tem por objetivo, apresentar as porcentagens de material que passam e ficam retidos nas peneiras previamente estabelecidas pelas faixas da norma da mistura estudada, analisando assim a composição do material em relação à dimensão de seus grãos. Esse ensaio pode ser realizado por peneiramento mecânico ou manual.

Uma amostra de material foi separada, quarteada e colocada em estufa à (110 ± 5) °C para secar, após resfriada, foi despejada e agitada de maneira manual num conjunto de peneiras pré-definidas e organizadas de maneira decrescente conforme a dimensão das malhas. As peneiras utilizadas foram: 25,0 – 19,0 – 12,5 – 9,5 – 4,75 – 2,36 – 1,18 – 0,6 – 0,3 – 0,075 mm.

Após o peneiramento, o material que ficou retido em cada peneira foi pesado de forma acumulada e calculadas as porcentagens de material acumulado que passa por cada peneira.

Figura 20: Sequências Decrescente das Peneiras e Balança de Precisão



Fonte: Autor (2016)

3.2.1.2 Resistência à Abrasão

O ensaio de abrasão “Los Angeles” foi feito na brita 1 e na brita 0, conforme a norma DNER – ME 035/98. O ensaio de abrasão define o desgaste que o agregado sofre, quando colocado na máquina “Los Angeles”, juntamente com uma carga abrasiva a uma certa sequência de revoluções à velocidade de 30 rpm a 33 rpm. A amostra foi previamente lavada e seca em estufa à temperatura de 105°C. As amostras foram escolhidas segundo as graduações presentes na norma, sendo selecionadas, a graduação A para a brita 1 e graduação B para a brita 0. Após o enquadramento, as amostras foram colocadas dentro da máquina Los Angeles, mostrada na imagem abaixo:

Figura 21: Máquina Los Angeles



Fonte: Autor (2016)

Foram utilizadas 12 esferas para a realização do ensaio na brita 1 e 11 esferas para a realização do ensaio na brita 0. Cada amostra de material então, foi colocada na máquina junto com a quantidade de esferas de sua respectiva graduação, foram submetidas a 500 rotações no tambor a uma velocidade de 30 rpm a 33 rpm. Terminadas as rotações da máquina, realizou-se o peneiramento do material na peneira de malha de 1,7mm, desprezando-se o material passante e em seguida o material foi lavado na mesma peneira e colocado na estufa por um período de 3 horas.

Concluído o processo, o cálculo da abrasão Los Angeles é feito pela equação abaixo:

$$A_n = \frac{M_n - M'_n}{M_n} \times 100$$

Onde:

A_n – Abrasão Los Angeles da graduação n , em %;

n – Graduação escolhida de acordo com a norma;

M_n – Massa da amostra seca colocada no equipamento, em g;

M'_n – Massa da amostra lavada e seca após o ensaio, em g.

3.2.1.3 Absorção dos Agregados Graúdos

O ensaio de absorção dos agregados graúdos foi conduzido segundo a norma rodoviária do DNER – ME 081/98. A absorção mostra o aumento da massa do agregado, através do preenchimento dos vazios permeáveis. Para execução do ensaio realizou-se o peneiramento da amostra seca e descartou-se o material passante na peneira de malha de 4,8mm.

Concluído o peneiramento, o material retido na peneira 4,8mm foi lavado e colocado na estufa a uma temperatura de 110° C para secar. Em seguida, retirou-se o material da estufa e o colocou-se para resfriar à temperatura ambiente num período entre 1 e 3 horas, logo após, pesa-se a amostra seca e em seguida coloca-se imerso em água, na temperatura ambiente por um período de 24 horas.

Figura 22: Amostra imersa em água



Fonte: Autor (2016)

Passadas as 24 horas, as amostras são retiradas da imersão, espalhadas sobre um pano para que se enxugue e se retire as películas visíveis de água (figura 23). Posteriormente, pesa-se a amostra novamente para a determinação de sua massa na condição saturada (Mh).

A absorção pode ser calculada pela fórmula abaixo:

$$A = \frac{Mh - Ms}{Ms} \times 100$$

Onde:

A – Absorção do agregado, em %;

Ms – Massa da amostra seca, em g;

Mh – Massa da amostra na condição saturada, em g.

Figura 23: Enxugamento dos agregados

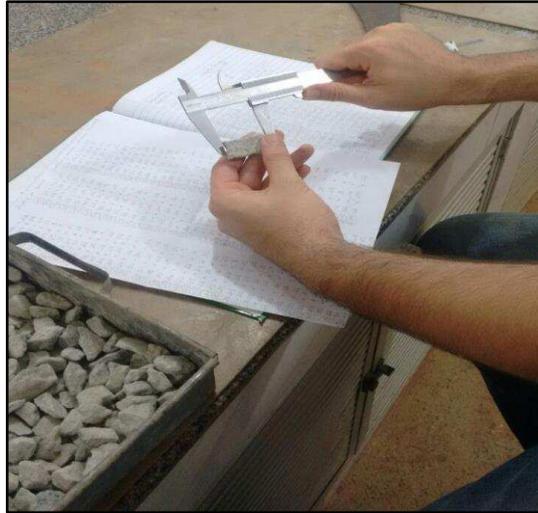


Fonte: Autor (2016)

3.2.1.4 Índice de Forma

O ensaio de índice de forma seguiu a norma brasileira NBR 7809/2006 da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) que tem por método o uso do paquímetro. O ensaio foi realizado somente para a brita 1, pelo fato de que na brita 0 havia quantidade excessiva de material passante na peneira 9,5mm, e para este ensaio usa-se apenas o retido nesta peneira. Foram selecionados 200 grãos previamente secos, para medição do comprimento (a), largura (b) e espessura (c) de maneira manual, pelo paquímetro. Após se obterem as medidas, o cálculo do índice de forma é feito pela média das razões de b/a e c/b.

Figura 24: Uso do paquímetro para medição de dimensão da amostra



Fonte: Autor (2016)

3.2.1.5 Equivalente de Areia

Este ensaio é normatizado pela norma DNER-ME 054/97 e tem por objetivo analisar a pureza dos agregados miúdos, verificando que estes não devem incluir grande quantidade de argila e material orgânico em sua composição. Foram preparadas amostras de pó de brita e areia que passavam na peneira de 4,8mm, a solução de trabalho é colocada dentro da proveta até alcançar a marca de referência, logo a amostra é colocada dentro da proveta por meio de funil, verificando se não há a acumulação de bolhas de ar, coloca-se a proveta em repouso por 10 minutos.

Depois desse período, agita-se a proveta de forma metódica por 30 segundos, vedando sua entrada. Em seguida, abre-se novamente a entrada e adiciona-se mais solução de trabalho até atingir a marcação superior, lavando as paredes internas, novamente deixa-se a proveta em repouso por mais 20 minutos para que em seguida, por meio de um pistão determinar o nível de material orgânico, possibilitando assim o cálculo do equivalente de areia da amostra.

Com as leituras da argila em suspensão (H1) e do agregado sedimentado (H2), o cálculo do equivalente de areia é realizado pela equação abaixo:

$$EA = \frac{H2}{H1} \times 100$$

Onde:

EA – Equivalente de areia da amostra, em %;

H1 – Leitura da argila em suspensão, em cm;

H2 – Leitura do agregado sedimentado, em cm.

Figura 25: Proveta graduada para leitura dos níveis de areia e argila



Fonte: Autor (2016)

3.2.1.6 Massa Específica dos Agregados Graúdos

Para definir a massa específica dos agregados graúdos foi utilizado o princípio de Arquimedes ao qual afirma que o volume que um sólido irregular desloca é equivalente ao seu próprio volume. Foi pesada e separada a partir de um cesto de malha metálica (figura 26.a), uma amostra seca (M_s), o qual o preenchia completamente com o agregado (figura 26.b) cujo a massa específica se deseja determinar, então com a ajuda de um recipiente com água e um suporte de metal, o cesto é imerso vazio e tarado (figura 26.c), e em seguida é imerso o cesto preenchido com a amostra é imerso novamente, para se obter o volume deslocado (V_d) da amostra.

Para a determinação da massa específica, usamos a equação a seguir:

$$\mu = \frac{M_s}{V_d}$$

Onde:

μ – Massa específica do agregado graúdo, em g/cm^3 ;

M_s – Massa seca da amostra, em g;

V_d – Volume deslocado pela amostra, em cm^3 .

Figura 26: Procedimento de determinação da massa específica do agregado graúdo



Fonte: Autor (2016)

3.2.1.7 Massa Específica dos Agregados Miúdos pelo frasco Chapman

Este ensaio é regido pela norma DNER-ME 194/98. Foi utilizado esse ensaio para determinação das densidades do pó de brita e da areia. Foi separada uma amostra de cada material e selecionada 500g do que ficou retido na peneira de 0,075mm e passava na peneira de 4,8mm, logo após foi seca na estufa a 110°C.

No frasco Chapman foi colocado então 200 cm³ de água, deixando em repouso para que a água contida nas paredes internas escorra totalmente, a amostra então foi colocada caprichosamente no frasco, sendo necessários talvez a leves batidas em sua base para a retirada de bolhas de ar. Verificou-se então a marcação no frasco que corresponde ao volume que o agregado deslocou. A partir disso pôde-se encontrar a densidade da amostra pela formula abaixo:

$$\gamma = \frac{500}{L - 200}$$

Onde:

γ – Massa específica do agregado miúdo, em g/cm³;

L – Leitura do conjunto água/agregado no frasco Chapman, em cm^3 .

Figura 27: Frasco Chapman para determinação da massa específica dos agregados miúdos



Fonte: Autor (2016)

3.2.1.8 Massa Específica pelo frasco Le Chatelier

Para este ensaio se utilizou a norma DNER-ME 085/94 que mostra o procedimento para utilização do frasco Le Chatelier, na obtenção da massa específica de materiais altamente finos. Foi utilizado para determinação das densidades da areia e da fibra de babaçu. Separou-se amostra de 60 g previamente secos, no frasco foi colocado querosene até se atingir a faixa entre as marcações de 0 e 1 cm^3 , foi verificado então e anotado a leitura inicial (L_i), inseriu-se a amostra dentro do frasco com cautela para que não vedasse a passagem do material entre as paredes internas do frasco. Depois de totalmente inserida a amostra fez-se a leitura final (L_f) verificando a marcação que o nível do querosene se encontra.

Figura 28: Frasco Le Chatelier e querosene utilizado



Fonte: Autor (2016)

O cálculo da massa específica do material é feito pela equação abaixo:

$$\mu = \frac{60}{L_f - L_i}$$

Onde:

μ – Massa específica do fíler, em g/cm³;

L_i – Leitura inicial do querosene, em cm³;

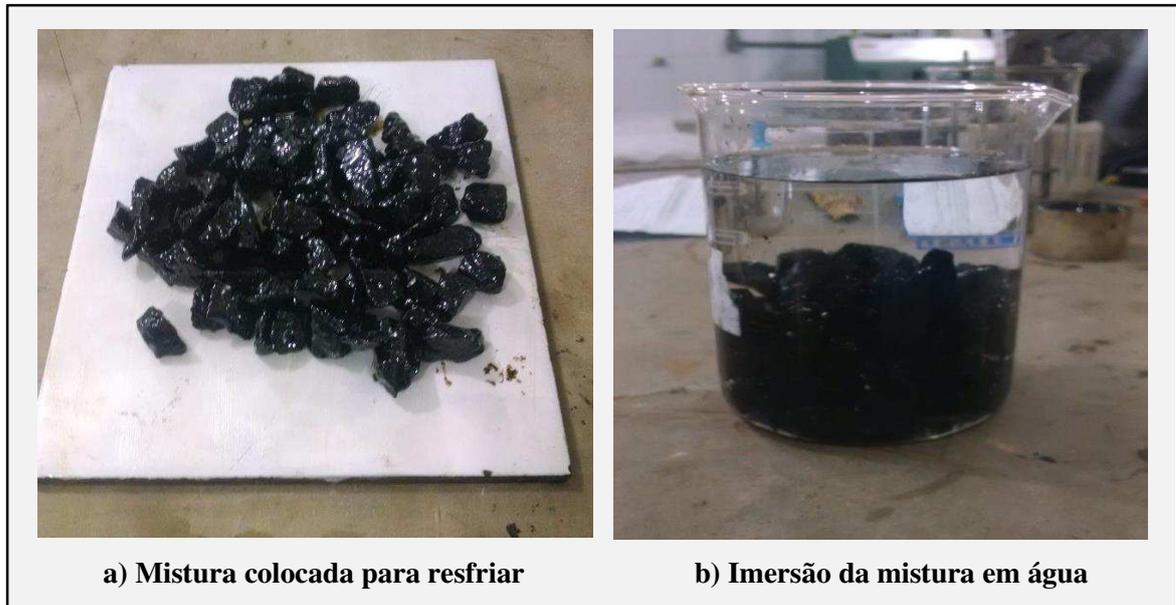
L_f – Leitura final do conjunto querosene/fíler, em cm³.

3.2.1.9 Adesividade ao Ligante Asfáltico

O ensaio foi seguido pela norma DNER-ME 078/94 e verificou-se a adesividade dos agregados graúdos, observando o escorrimento da película de ligante asfáltico que encobre o agregado, no qual amostra fica numa temperatura de 40°C imersa em água destilada, durante um período de 72 horas. A amostra com 500 g, foi separada do material que passava na peneira de 19 mm e ficava retido na peneira 12,7 mm. Esta, foi lavada, colocada imersa em água destilada e levada para a estufa para permanecer durante 2 horas numa temperatura de 120°C.

Posteriormente retirou-se a amostra e misturou-se 17,5 g de ligante, quando estes foram aquecidos às temperaturas de 100 e 120°C respectivamente, concluindo quando toda a superfície dos agregados foi coberta. A mistura então, é colocada sobre uma superfície livre para resfriar e após resfriadas é posta num béquer totalmente imersa em água destilada e levada para estufa numa temperatura de 40°C durante um tempo de 72 horas.

Figura 29: Resfriamento e imersão da mistura em água



Fonte: Autor (2016)

O desprendimento parcial ou total, ou o não-desprendimento do ligante da superfície do agregado após as 72 horas, que verifica se o resultado do ensaio foi satisfatório ou insatisfatório.

3.2.2 Ensaio no Ligante Asfáltico

3.2.2.1 Ensaio de Penetração

O ensaio é normatizado pela norma rodoviária DNIT-ME 155/2010 e mostra o procedimento para a verificação da profundidade ao qual uma agulha padrão penetra na amostra de ligante sob certas condições estabelecidas. O CAP utilizado foi o 50/70, e as condições definidas foram: temperatura de 25°C, carga de 100g (massa da agulha padrão) e um tempo de 5s na aplicação da carga.

O CAP foi colocado num recipiente padrão e mantido em temperatura de 25°C, com o auxílio de um penetrômetro, posicionou-se a agulha de maneira que ela tocasse a superfície da amostra, anotou-se então a leitura inicial (Li) no penetrômetro, em seguida, perfurou-se a amostra com a agulha padrão por um tempo de 5 s, ao término deste tempo anotou-se a leitura final (Lf) que indicava a profundidade alcançada na amostra com a carga e tempo de aplicação dito anteriormente.

Figura 30: Penetrômetro para avaliação da penetração da agulha na amostra de CAP



Fonte: Autor (2016)

Concluído o processo, o cálculo foi feito pela fórmula abaixo:

$$P = Lf - Li$$

Onde:

P – Penetração da amostra de CAP, em décimo de mm;

Li – Leitura inicial do penetrômetro, em décimo de mm;

Lf – Leitura final do penetrômetro, em décimo de mm.

O ensaio foi realizado três vezes para uma mesma amostra, modificando apenas o local de aplicação da carga, e o resultado final, obtido pela média dos três ensaios.

3.2.2.2 Ensaio de Viscosidade Saybolt-Furol

A norma que rege este ensaio é a NBR 14950/2003, e esta mostra o procedimento utilizando o método Saybolt-Furol para definir a viscosidade do ligante asfáltico. As temperaturas escolhidas para o ensaio foram: 135, 150 e 177 °C, e o ligante foi aquecido com aproximadamente 10°C a mais para cada temperatura e ao controle de um termômetro esperou-se o tempo necessário para que a temperatura caísse e ficasse com o valor exato das

temperaturas escolhidas. Então, com o auxílio de um funil despejou-se o ligante na entrada do viscosímetro Saybolt-Furol, vedando sua saída até que se alcançasse o nível necessário para o ensaio, alcançado o nível retirou-se a vedação deixando o ligante escorrer num recipiente padrão, preenchendo-o até a marcação desejada, o tempo foi cronometrado desde a retirada da vedação até o preenchimento do recipiente com ligante no nível marcado.

Figura 31: Ensaio de viscosidade Saybolt-Furol



Fonte: Autor (2016)

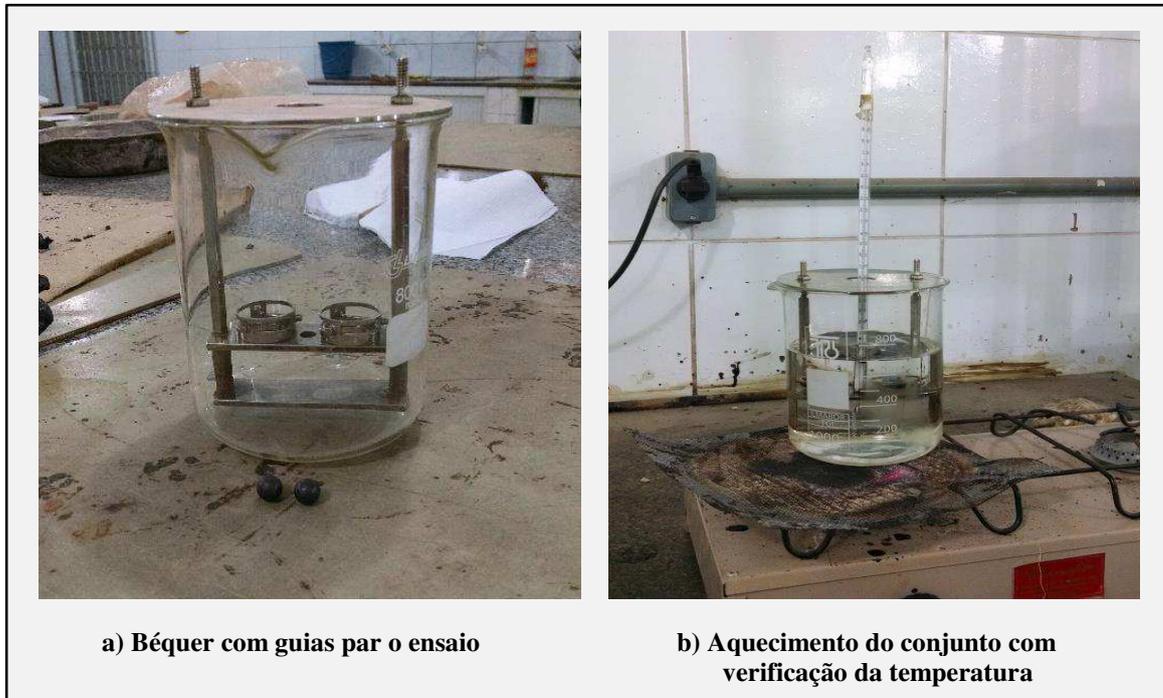
Concluído o processo, plotou-se um gráfico relacionando as temperaturas escolhidas e seus respectivos tempos de escorrimento à marcação do recipiente, este gráfico foi utilizado para a determinação das temperaturas de mistura e compactação da mistura asfáltica.

3.2.2.3 Ensaio de Ponto de Amolecimento (Anel e Bola)

O ensaio é descrito pela norma rodoviária DNIT-ME 131/2010, e esta busca de forma empírica relacionar a temperatura com que o ligante amolece quando este é aquecido. Aquece-se o ligante a fim de se obter uma viscosidade necessária para o preenchimento dos anéis utilizados neste ensaio, após preenchidos, estes foram deixados em repouso por 30 minutos em superfície lisa para resfriar. Depois do resfriamento o anel foi acoplado com as guias e esferas dentro de um béquer preenchido com água; o conjunto foi então aquecido avaliando-se a temperatura com um termômetro em contato com a água. O ponto de

amolecimento é determinado no momento em que o CAP toca a placa de referência. Caso a diferença entre as duas amostras for maior que 2°C o ensaio deve ser repetido novamente.

Figura 32: Ensaio de ponto de amolecimento do CAP



Fonte: Autor (2016)

3.2.3 Ensaios na Mistura Asfáltica

3.2.3.1 Ensaio de Escorrimento (Método de Schellenberg)

Este ensaio foi baseado na norma europeia EN 12697-18, que descreve o procedimento do método de Schellenberg para se encontrar o grau de escorrimento do ligante das misturas asfálticas. Para este ensaio foram preparadas para cada teor de fibra, três amostras com 1000g de mistura asfáltica, obedecendo-se às temperaturas designadas no ensaio de viscosidade e ao traço calculado; duas dessas amostras foram selecionadas, e colocadas cada uma em um béquer com diâmetro de 100 mm e capacidade de no mínimo de 800ml. Estes béqueres foram pesados e tarados antes de se despejarem as amostras nestes, após isso, as amostras foram pesadas.

Prosseguindo, levou-se os dois béqueres para a estufa para permanecer à temperatura de compactação (140°C), durante um período de 1h ± 1minuto. Terminado esse período, o primeiro béquer foi retirado da estufa e virado durante um período de cerca de 10s, de maneira que sua base estivesse voltada para cima, despejando-se assim, a amostra num

outro recipiente, ficando uma certa quantidade de material nas paredes e fundo do béquer. Pesou-se então o béquer novamente, para se obter a massa do material que ficou retida. Repete-se o mesmo procedimento para o outro béquer.

Figura 33: Procedimento do ensaio de Escorrimento Método de Schellenberg



Fonte: Autor (2016)

O resultado do escorrimento de ligante em uma mistura asfáltica é dada pela porcentagem de fibras e betume correspondente ao material que ficou retido no béquer, em relação ao valor da massa total da mistura. Esta porcentagem não deve ultrapassar o valor de 0,3% para ser considerada adequada, desejando-se que seja igual ou inferior à 0,2%.

3.2.3.2 Dosagem Marshall

Uma das formas de elaboração de corpos de prova (CP's) de misturas asfálticas usinadas à quente para se avaliar parâmetros como estabilidade, resistência à tração, teor ótimo de projeto, entre outros; é a dosagem marshall, estabelecida pela norma rodoviária DNER-ME

043/95.

O ensaio foi realizado após os ensaios de caracterização dos materiais, ou seja, todos os ensaios nos agregados e ligante. Após os ensaios de caracterização, foi realizado o enquadramento granulométrico da mistura, na faixa da norma do tipo de revestimento utilizado neste estudo. Apenas a partir disso pode-se iniciar este ensaio.

Normalmente este ensaio é utilizado para encontrar o teor ótimo de ligante para a mistura, no entanto, neste estudo, apropriou-se deste método para se encontrar o teor ótimo de fibras de babaçu que serão usadas para se evitar o escorrimento da mistura e avaliar seus parâmetros.

Foram então definidos 5 teores de fibra (1, 2, 3, 4 e 5%) para mesmos 6% de teor de ligante (valor mínimo exigido pela norma, ver figura 15, item 2.5.4); para cada teor de fibra, foram elaborados 6 CP's (3 destes, para avaliação da estabilidade e 3 para a resistência à tração). A temperatura de mistura e compactação foram definidas no ensaio de viscosidade Saybolt-Furol descrito no item 3.2.2.2.

Para composição dos corpos de prova, seguiu-se o procedimento da sequência abaixo:

1. Secagem dos agregados e pesagem de cada um de acordo com o traço proposto;
2. Pré-aquecimento dos agregados em estufa;
3. Aquecimento do ligante à temperatura de 155°C e dos agregados à 165°C (10° a mais que o ligante), determinadas pelo ensaio de viscosidade conforme a tabela acima;
4. Aquecimento de molde metálico à temperatura de 100°C
5. Mistura manual do ligante aos agregados num período de 2 a 3 minutos, até que toda a superfície dos agregados fosse coberta;
6. Compactação manual da mistura com o uso de soquete, sendo dados 50 golpes em cada face, na temperatura de 140°C.

Figura 34: Dosagem Marshall - procedimento para compactação dos CP's



Fonte: Autor (2016)

Depois de compactado esperou-se 24 horas para realizar o desmolde dos CP's. Foram compactados ao todo 30 corpos de prova, e para se determinar o teor de fibra ideal foram selecionados 3 CP's de cada teor de fibra para serem pesados e determinados seus volumes com o objetivo de se calcular os seguintes parâmetros:

- Densidade aparente (Dap);

$$Dap = \frac{Ms}{V} ; (%)$$

Onde:

Ms – Massa seca do CP (g);

V – Volume do CP (cm³).

- Densidade Máxima Teórica (DMT);

$$DMT = \frac{100}{\frac{\%CAP}{\mu_{CAP}} + \frac{\%B1}{\mu_{B1}} + \frac{\%B0}{\mu_{B0}} + \frac{\%Po}{\mu_{Po}} + \frac{\%Ar}{\mu_{Ar}} + \frac{\%Fi}{\mu_{Fi}} + \frac{\%Fb}{\mu_{Fb}}} ; (%)$$

Onde:

%CAP, %B1, %B0, %Po, %Ar, %Fi, %Fb – são as porcentagens de CAP, brita 1, brita 0, pó de brita, areia, fíler e de fibra em relação à massa total da mistura asfáltica (%);

μ_{CAP} , μ_{B1} , μ_{B0} , μ_{Po} , μ_{Ar} , μ_{Fi} , μ_{Fb} – são as massas específicas de cada material utilizado (g/cm³).

- Volume de Vazios (Vv);

$$Vv = \frac{DMT - Dap}{DMT} ; (%)$$

- Vazios Com Betume (VCB);

$$VCB = \frac{Dap \times \%CAP}{\mu_{CAP}} ; (%)$$

- Vazios do Agregado Mineral (VAM);

$$VAM = 100 - \left(\frac{Dap \times \sum \% n}{Vd} \right) ; (%)$$

Onde:

$\sum \% n$ – porcentagem em massa dos agregados

- Relação Betume/Vazios (RBV).

$$RBV = 100 \times \left(\frac{VAM - Vv}{VAM} \right) ; (%)$$

Figura 35: Pesagem do corpo de prova



Fonte: Autor (2016)

Figura 36: Definição do volume do CP pelo volume deslocado de água



Fonte: Autor (2016)

Calculados os parâmetros para cada teor de fibra, pôde-se montar os gráficos necessários para determinação do teor ótimo de fibra, apresentado no item 4.3.5.

3.2.3.3 Estabilidade Marshall e Fluência

A norma que rege o ensaio de estabilidade Marshall é a DNER-ME 043/95, a mesma da dosagem marshall, primeiramente foram calculadas as alturas médias dos 3 CP's escolhidos para este ensaio, necessárias para a aplicação futura de fator de correção presente nesta norma. Logo, colocou-se os 3 corpos de prova imersos em banho maria numa temperatura

de 60°C durante um período de 30 a 40 minutos, em seguida, estes foram retirados rapidamente do banho e colocados na prensa Marshall presos à anéis envoltórios. A prensa aplica uma carga que aumenta gradativamente, até o rompimento do CP. A leitura da estabilidade foi feita apenas observando o visor do aparelho que indica automaticamente o valor da carga imediata ao rompimento, a leitura da fluência foi realizada com o auxílio do paquímetro utilizado antes e após o rompimento avaliando-se o deslocamento vertical gerado pela carga aplicada.

Figura 37: Medição de dimensões dos CP's e imersão em banho maria



Fonte: Autor (2016)

Figura 38: Prensa Marshall automática



Fonte: Autor (2016)

Após o rompimento, a estabilidade Marshall é determinada pela equação abaixo:

$$Es = Lp \times Fp \times Fh$$

Onde:

Es – Estabilidade Marshall, em kgf;

Lp – Leitura da prensa, em kgf;

Fp – Fator de correção da prensa;

Fh – Fator de correção em função da altura média do CP.

O fator em função da altura é calculado, de acordo com a norma, pela expressão:

$$Fh = 927,23 \times h^{-1,64}$$

Onde:

Fh – Fator de correção em função da altura do CP;

h – Altura média do CP, em mm;

3.2.3.4 Resistência à Tração

Para o ensaio de resistência à tração, seguiu-se a norma DNIT-ME 136/2010. Os 3 CP's que foram escolhidos para este ensaio também tiveram a altura média calculada, juntamente com o diâmetro. Terminado as medições, estes foram colocados em ambiente com temperatura de 25°C e ao entrar em equilíbrio de temperatura com o ambiente, fato comprovado com o auxílio de um termômetro, foram deixados por um período de 2 horas. Passado este tempo, foram levados para a prensa Marshall e presos por anéis envoltórios que possuem frisos metálicos que possibilitam a compressão diametral do CP, o que não ocorre nos anéis utilizados no ensaio de estabilidade Marshall. Os CP's então são rompidos de maneira semelhante ao comentado no item anterior, verificando-se no visor do aparelho a carga imediata ao rompimento.

Figura 39: Prensa Marshall e detalhe dos anéis envoltórios



Fonte: Autor (2016)

O cálculo da resistência à tração foi feito usando a equação abaixo:

$$\sigma = \frac{2F}{100\pi HD}$$

Onde:

σ – Resistência à tração, em Mpa;

F – Carga de ruptura, em N;

D – Diâmetro do CP, em cm;

H – Altura do CP, em cm.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A seguir, serão apresentados os resultados observados neste estudo.

4.1 RESULTADOS DOS ENSAIOS NOS AGREGADOS

Os agregados utilizados na mistura asfáltica SMA deste estudo foram: brita 1, brita 0, pó de brita, areia e fíler (cimento). Para estes, foram realizados os ensaios descritos nos subitens 3.2.1.1 ao 3.2.1.9, nos quais se destacou o procedimento feito em cada um, conforme cada norma vigente citada nos mesmos.

4.1.1 Granulometria

A granulometria dos agregados foi verificada pelo ensaio de peneiramento, descrito no item 3.2.1.1, segundo a norma rodoviária DNIT-ES 083/98. Para efetuação futura do enquadramento granulométrico, realizou-se o peneiramento com a dimensão das malhas das peneiras exigidas pela norma da AASHTO MP8-01, as quais, foram: 25,0 – 19,0 – 12,5 – 9,5 – 4,75 – 2,36 – 1,18 – 0,6 – 0,3 – 0,075 mm.

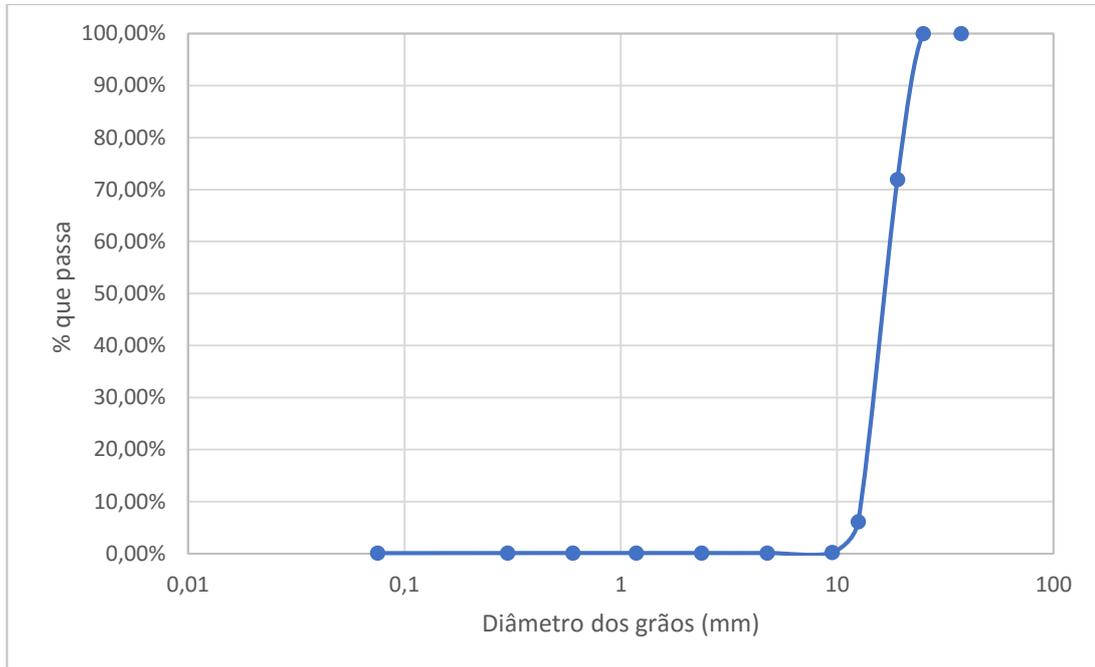
Quadro 5: Granulometria dos Agregados

Nº #	PENEIRA (MM)	% QUE PASSA				
		B1	B0	PÓ DE B.	AREIA	FÍLER
1 ½"	37,5	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%
1"	25	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%
¾"	19	72,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%
½"	12,5	6,1%	97,7%	100,0%	100,0%	100,0%
⅜"	9,5	0,2%	87,6%	100,0%	100,0%	100,0%
Nº 4	4,75	0,1%	25,2%	99,4%	100,0%	100,0%
Nº 8	2,36	0,1%	6,1%	80,1%	100,0%	100,0%
Nº 16	1,18	0,1%	3,9%	59,7%	99,9%	100,0%
Nº 30	0,6	0,1%	3,0%	41,1%	99,3%	100,0%
Nº 50	0,3	0,1%	2,6%	25,2%	16,6%	99,6%
Nº 200	0,075	0,1%	1,6%	10,7%	1,8%	96,8%

Fonte: Autor (2016)

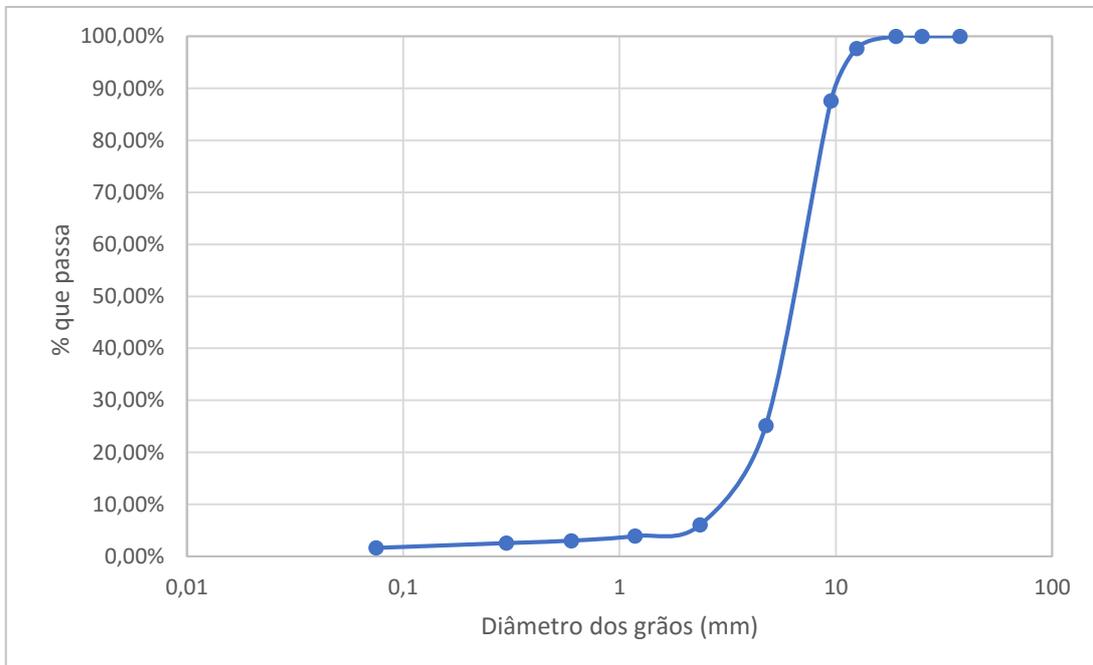
A seguir se apresentam os gráficos curvas granulométricas da brita 1, brita 0, pó de brita, areia e fíler (cimento); relacionando-se a dimensão dos grãos (mm) com a porcentagem de material que passa nas malhas das peneiras citadas.

Gráfico 1: Curva granulométrica da Brita 1



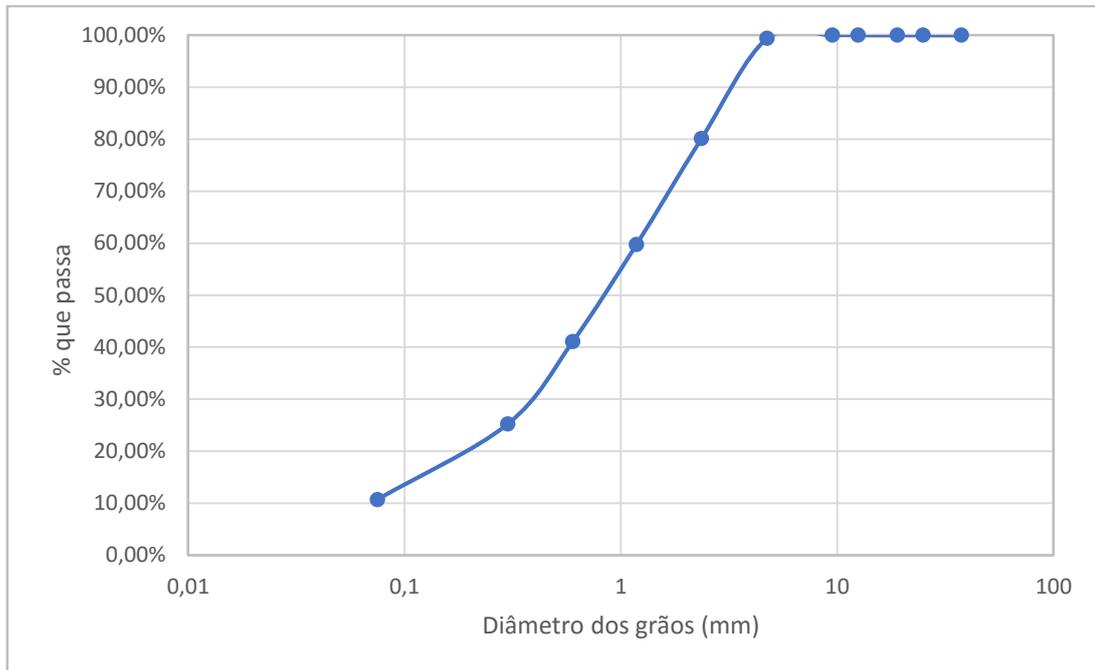
Fonte: Autor (2016)

Gráfico 2: Curva granulométrica da Brita 0



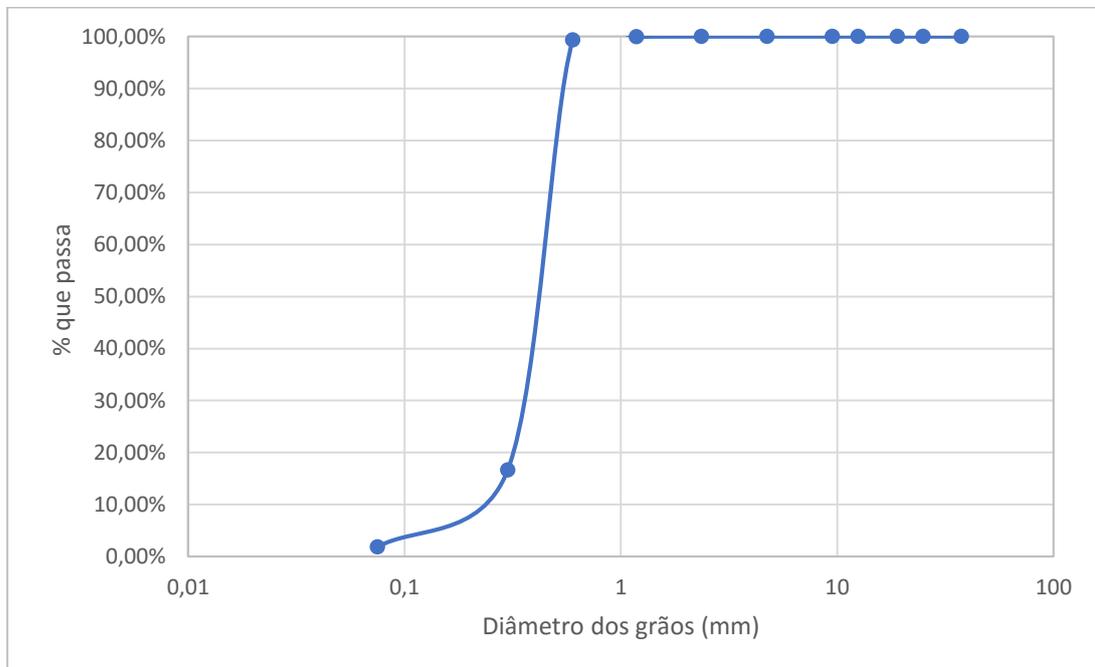
Fonte: Autor (2016)

Gráfico 3: Curva granulométrica do Pó de Brita



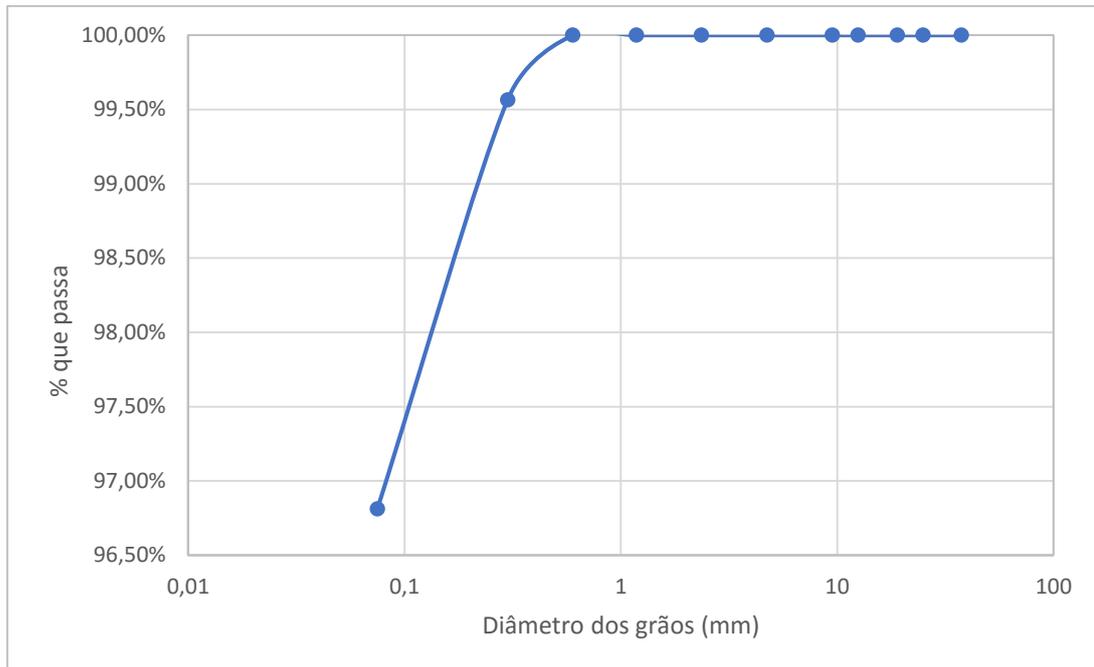
Fonte: Autor (2016)

Gráfico 4: Curva granulométrica da Areia



Fonte: Autor (2016)

Gráfico 5: Curva granulométrica do Fíler (Cimento Portland)



Fonte: Autor (2016)

4.1.2 Enquadramento Granulométrico

Para o enquadramento granulométrico e definição do traço da mistura, utilizou-se o quadro 6 do item 4.1.1, para o cálculo da porcentagem de cada material que deve existir na mistura, exigindo-se que esta combinação apresente granulometria entre os limites da faixa granulométrica escolhida na norma.

A faixa escolhida para este estudo foi a de 25 mm da AASHTO MP8-01, apesar da não recomendação de uso dessa faixa, conforme NAPA (2002), pelo fato dessa graduação não refletir prática típica para aplicações de SMA. No entanto, se constatou a tendência a qual a granulometria dos materiais utilizados nesse estudo se direcionou, verificando-se que apenas nesta faixa se conseguiria o enquadramento granulométrico sem o uso de correções adicionais, levou-se em conta também o fato de ser a situação mais desfavorável para o escoamento de ligante, pois essa faixa requer uma quantidade maior ainda de agregados graúdos dos que as mais habituais, gerando assim uma maior porcentagem de vazios.

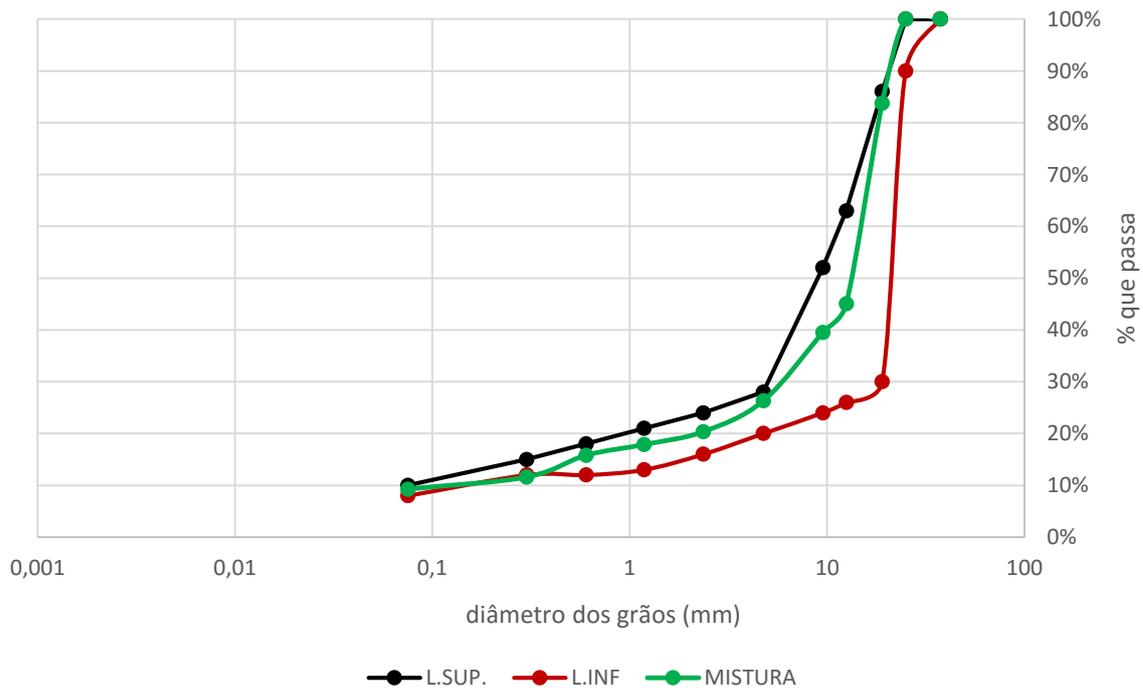
Observados os limites e calculado o traço, temos abaixo o quadro mostrando o traço proposto para a mistura a ser avaliada e o gráfico da sua curva granulométrica entre os limites da faixa.

Quadro 6: Faixas granulométricas SMA, (porcentagem de volume que passa)

STONE MATRIX ASPHALT (SMA) - FAIXA 25mm AASHTO MP8-01										
Nº #	PEN. (MM)	% QUE PASSA					FAIXA		LIM. MEDIO	MISTURA
		B1	B0	PÓ DE BRITA	AREIA	FÍLER	LIM. DA FAIXA			
1 ½"	37,5	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100%	100%	100%	100%
1"	25	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	90%	100%	95%	100%
¾"	19	72,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	30%	86%	58%	84%
½"	12,5	6,10%	97,70%	100,00%	100,00%	100,00%	26%	63%	45%	45%
3/8"	9,5	0,20%	87,60%	100,00%	100,00%	100,00%	24%	52%	38%	40%
4	4,75	0,10%	25,20%	99,40%	100,00%	100,00%	20%	28%	24%	26%
8	2,36	0,10%	6,10%	80,10%	100,00%	100,00%	16%	24%	20%	20%
16	1,18	0,10%	3,90%	59,70%	99,90%	100,00%	13%	21%	17%	18%
30	0,6	0,10%	3,00%	41,10%	99,30%	100,00%	12%	18%	15%	16%
50	0,3	0,10%	2,60%	25,20%	16,60%	99,60%	12%	15%	14%	12%
200	0,075	0,10%	1,60%	10,70%	1,80%	96,80%	8%	10%	9%	9%
TRAÇO		58,00%	21,00%	10,00%	3,00%	8,00%				

Fonte: Autor (2016)

Gráfico 6: Curva granulométrica da mistura entre as faixas limítrofes da norma



Fonte: Autor (2016)

4.1.3 Resistência à Abrasão

O ensaio de resistência à abrasão foi realizado para analisar o desgaste na brita 1 e brita 0, causado pelo atrito e impacto gerados na máquina Los Angeles, que tenta simular o efeito que as cargas aplicadas no trânsito, podem gerar nos agregados. O procedimento realizado foi descrito no item 3.2.1.2, segundo a norma rodoviária DNER – ME 035/98. O quadro abaixo mostra os resultados gerados no ensaio.

Quadro 7: Resistência à abrasão da brita 1 e brita 0

	BRITA 1	BRITA 0
GRADUAÇÃO	A	B
M1	5000,00	5000,00
M2	4117,80	4008,50
RESULTADO	17,64%	19,83%

Fonte: Autor (2016)

Os resultados foram bastantes satisfatórios, pois a norma DNER-ME 035/98 especifica que para utilização dos agregados em mistura asfáltica a resistência à abrasão, deve ser menor que 50%. No entanto, esta mistura segue os padrões da norma AASHTO MP8-01 que exige que no máximo 30% de desgaste à abrasão. Nota-se que os materiais utilizados suprem as condições impostas, mostrando-se adequados ao uso na mistura asfáltica estudada.

4.1.4 Absorção

A análise da absorção dos agregados graúdos foi executada conforme o item 3.2.1.3, de acordo com a norma DNER – ME 081/98. Este ensaio tem procedimento simples, mas tem valor significativo nas características da mistura, pois um agregado com grande absorção diminui a película de ligante que o envolve, o que enfraquece a ligação entre os materiais pétreos. Além disso a necessidade de uma quantidade maior de ligante pode gerar um grande aumento nos custos da produção, o que pode tornar a mistura inviável. Segue abaixo no quadro 9, os resultados deste ensaio, realizados na brita 1 e brita 0.

A AASHTO MP8-01 requisita que a absorção dos agregados seja inferior ou no máximo igual a 2%. Como verificado no quadro a seguir, tanto a brita 1 como a brita 0 apresentaram valores muito abaixo do limite solicitado pela norma, garantindo assim aos agregados mencionados, a qualificação necessária para a utilização nesse tipo de mistura.

Quadro 8: Absorção da brita 1 e brita 0

	BRITA 1	BRITA 0
Ms (g)	1519,30	1507,80
Mh (g)	1523,60	1519,00
ABSORÇÃO (%)	0,283%	0,743%

Fonte: Autor (2016)

4.1.5 Índice de Forma

O ensaio de índice de forma foi realizado conforme o item 3.2.1.4, segundo a NBR 7809/2006, este ensaio busca verificar a forma dos grãos, pois esta traz influência na resistência e trabalhabilidade da mistura. Os agregados da amostra apresentaram (quadro 12) média de razão entre comprimento, largura e espessura maiores que 0,5, sendo assim os agregados apresentam forma cúbica.

4.1.6 Equivalente de Areia

O equivalente de areia, foi realizado na areia e no pó de brita, esse ensaio busca avaliar a pureza do material, ou seja, a porcentagem desse mesmo material que contém na amostra analisada, pois mesmo que em pequenas quantidades, existem elementos indesejados associados, como a argila, e substâncias nocivas. Logo, se diz respeito à qualidade e transparência do agregado. O procedimento foi descrito no item 3.2.1.5, de acordo com a norma DNER-ME 054/97. O quadro a seguir revela os resultados deste ensaio nos materiais desta pesquisa.

Quadro 9: Equivalente de areia da Areia e Pó de Brita

	AREIA	PÓ DE BRITA
H1 (cm)	8,45	8,25
H2 (cm)	6,30	5,75
EA (%)	74,56%	69,70%

Fonte: Autor (2016)

O equivalente de areia dos materiais utilizados no ensaio deve ser maior ou igual à 55%, conforme a norma DNER-ME 054/97. Para a norma MP8-01 da AASHTO o equivalente de areia também deve ser no mínimo 55%. Logo, tanto a areia como o pó de brita se apresentaram aptos para utilização neste estudo.

4.1.7 Massa Específica

A definição da massa específica dos agregados foi realizada com diferentes ensaios de acordo com a dimensão dos agregados. A massa específica do CAP não foi calculada por já ter sido informada no fornecimento do mesmo. Para a brita 1 e brita 0, utilizou-se o método do cesto descrito no item 3.2.1.5, para a areia e o pó de brita foi usado o frasco Chapman comentado no item 3.2.1.6 e a massa específica do cimento e da fibra foi definida com auxílio do frasco Le Chatelier mencionado no item 3.2.1.7.

Quadro 10: Massa Específica dos materiais

CAP 50/70		BRITA 1		BRITA 0	
D.CAP (g/cm ³)	1,030	MÉTODO DO CESTO		MÉTODO DO CESTO	
AREIA		Ps (g)	1115	Ps (g)	1081,70
FRASCO CHAPMAN		V (cm ³)	401,5	V (cm ³)	389,70
L (mm)	389,00	D.B1 (g/cm ³)	2,777	D.B0 (g/cm ³)	2,776
D.A (g/cm ³)	2,646	PÓ DE BRITA		FÍLER	
FIBRA		FRACO CHAPMAN		FRACO LE CHATELIER	
FRACO LE CHATELIER		L (mm)	380	Ps (g)	60,00
D.Fb (g/cm ³)	1,254	D.PO (g/cm ³)	2,778	Vi (cm ³)	0,40
				Vf (cm ³)	20,90
				D.F (g/cm ³)	2,927

Fonte: Autor (2016)

4.1.8 Adesividade ao Ligante

O ensaio de adesividade dos agregados ao ligante se baseou na norma DNER-ME 078/94 e ocorreu segundo o item 3.2.1.8. A adesividade é uma característica importante para a mistura, pois avalia a afinidade da ligação entre o agregado e o ligante. Um agregado com baixa capacidade de adesão pode causar enfraquecimento da mistura e facilitar a deterioração pela ação da água. O resultado do ensaio foi definido de forma visual, ao qual se observou a condição do agregado coberto de ligante depois de passado o período de imersão de 24 horas. Caso haja partes do agregado ao qual a película de ligante escorreu, o resultado é considerado insatisfatório, caso contrário, se considera satisfatório.

Constatou-se que após as 24 horas, pequenas porções da capa de ligante que envolvia o agregado escorreram, mostrando partes da superfície do agregado. Logo a adesividade foi considerada insatisfatória por este método, havendo necessidade de se adicionar um melhorador de adesividade.

4.1.9 Avaliação Geral das Propriedades dos Agregados

Quadro 11: Quadro-resumo de avaliação das propriedades estudadas dos agregados

ENSAIO	NORMA TÉCNICA UTILIZADA	AGREGADO				PARÂMETROS DA AASHTO MP8-01	
		BRITA1	BRITA 0	PÓ DE B.	AREIA	AGR. GRAÚDO	AGR. MIÚDO
Abrasão "Los Angeles"	DNER-ME 035/98	17,64	19,8	-	-	≤ 30%	-
Absorção	DNER-ME 081/98	0,28	0,74	-	-	≤ 2%	-
Índice de forma	NBR 7809 /2006	b/a = 0,8 c/a = 0,7	-	-	-	≥ 0,50	-
Equivalente de areia	DNER-ME 054/97	-	-	69,7	74,6	-	≥ 55%
Massa específica	*	2,777	2,776	2,778	2,646	-	-
Adesividade	DNER-ME 078/94	Insatisfatório	-	-	-	Satisfatória quando não desprender ligante das faces do agregado	-

(*) para massa específica utilizou-se mais de uma norma, ver item 4.1.7.

Fonte: Autor (2016)

4.2 RESULTADOS DOS ENSAIOS NO LIGANTE

O CAP utilizado foi o 50/70, fornecido pela usina de asfalto da prefeitura de São Luís, capital do Maranhão. Os ensaios realizados foram para a caracterização e comprovação das características atribuídas a este ligante, como o ensaio de penetração, ensaio de viscosidade Saybolt-Furol e ensaio do ponto de amolecimento (anel e bola).

4.2.1 Penetração

Para se avaliar a consistência do CAP e comprovar sua classe de penetração, executou-se o ensaio de penetração, que se sucedeu conforme o procedimento dito no item 3.2.2.1 de acordo com a norma DNIT-ME 155/2010. Abaixo segue o quadro com o resultado deste ensaio.

Quadro 12: Ensaio de Penetração do CAP 50/70

1º ENSAIO		2º ENSAIO		3º ENSAIO		RESULTADO FINAL
Li (0,1mm)	108	Li (0,1mm)	227	Li (0,1mm)	204	
Lf (0,1mm)	165	Lf (0,1mm)	287	Lf (0,1mm)	262	
RESULTADO	57	RESULTADO	60	RESULTADO	58	58 mm

Fonte: Autor (2016)

Como se observa, o resultado da média da penetração nos três ensaios se localiza entre a faixa especificada pela classe de penetração do CAP, logo este ligante tem condições de utilização em misturas asfálticas, inclusive as desta pesquisa.

4.2.2 Viscosidade Saybolt-Furol

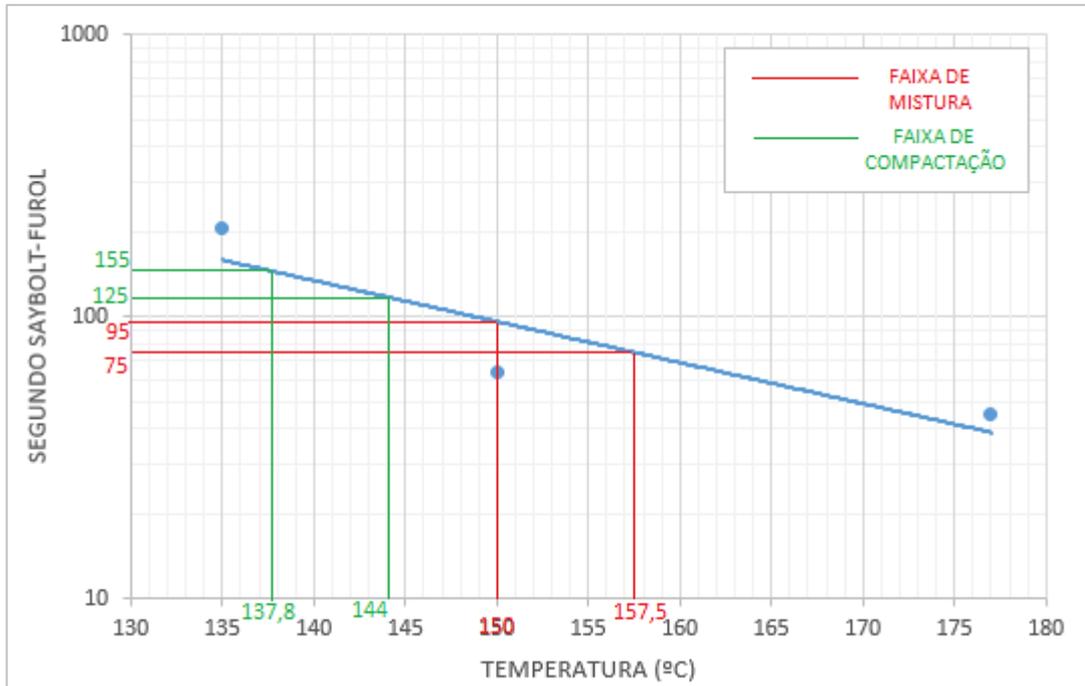
A viscosidade do ligante foi verificada pelo viscosímetro Saybolt-Furol seguindo-se o procedimento mencionado no item 3.2.2.2 de acordo com a NBR 14950/2003. Abaixo segue o quadro com as viscosidades medidas para as três temperaturas utilizadas no ensaio e em seguida o gráfico 7, gerado a partir destes pontos. Com este gráfico se analisou as faixas de viscosidade para encontrar as temperaturas de mistura (85 ± 10 SSF) entre o agregado e o ligante e a temperatura de compactação (130 ± 15 SSF) ideal para a mistura, ambas descritas no quadro 5 do item 3.2.3.2.

Quadro 13: Viscosidade do ligante nas temperaturas de ensaio

TEMPERATURA (°C)	SEGUNDO SAYBOLT-FUROL (SSF)
135	206
150	64
177	45

Fonte: Autor (2016)

Gráfico 7: Viscosidade em função da temperatura do ligante



Fonte: Autor (2016)

4.2.3 Ponto de Amolecimento

Para se verificar em qual temperatura o CAP utilizado começa a aquecer de forma que já se obtenha um certo escoamento, recorreu-se ao ensaio de ponto de amolecimento ou ensaio de anel e bola descrito no item 3.2.2.3 conforme a norma DNIT-ME 131/2010.

Quadro 14: Temperatura de Amolecimento do CAP

CAP 50/70	
T (°C)	56
NORMA	Min 46

Fonte: Autor (2016)

Conclui-se que a partir de 56°C, o CAP começa a amolecer já apresentando certo escoamento, mesmo que bastante viscoso. A norma DNIT-ME 131/2010 exige que essa temperatura seja no mínimo 46°C, logo o CAP estudado foi aprovado neste quesito

4.2.4 Avaliação geral das propriedades do ligante

Quadro 15: Quadro-resumo de avaliação das propriedades estudadas do ligante

ENSAIO		NORMA TÉCNICA UTILIZADA	PARÂMETRO DO LIGANTE ESTUDADO	PARÂMETROS DA ASS. BRASILEIRA DE CAP (ANP,2005)
Penetração		DNIT-ME 155/2010	58	50-70
Viscosidade Saybolt-Furol	À 135°C	NBR 14950/2003	206	Mín. 141
	À 150°C		64	Mín. 50
	À 177°C		45	30 a 150
Ponto de Amolecimento		DNIT-ME 131/2010	56	Mín. 46
Massa Específica		*	1,030	-

* no fornecimento do CAP, não se especificou o método de avaliação da massa esp.

Fonte: Autor (2016)

Constatou-se então pela avaliação do quadro acima que o ligante utilizado nesta pesquisa apresenta clara concordância com as exigências das normas destacadas, confirmando que é apropriado ao uso em misturas asfálticas.

4.3 RESULTADOS DOS ENSAIOS NA MISTURA ASFÁLTICA

Para a mistura asfáltica estudada, se avaliou a queda da porcentagem de escorrimento ao acréscimo de fibra, parâmetros da dosagem marshall como índice de vazios, relação betume-vazios, entre outros; a estabilidade, a resistência à tração e a sensibilidade da mistura compactada à ação deletéria da água.

4.3.1 Escorrimento

A análise do escorrimento se deu pelo método alemão conhecido por Schellenberg comentado no item 3.2.3.1, baseado na norma europeia EN 12697-18. Os resultados deste ensaio seguem no quadro abaixo.

Quadro 16: Verificação do escorrimento com a variação da porcentagem de fibra

% DE CAP	% DE FIBRA	PESO DO BÉQUER	PESO DA AMOSTRA	PESO RETIDO NO BÉQUER	ESCORRIMENTO
6%	1%	276,6	1034,3	286,1	0,918%
		267,1	1020,5	277,9	1,058%
	2%	266,6	1056,8	270,7	0,388%
		267,5	1047,7	271,5	0,382%
	3%	278,6	1050,5	280,8	0,209%
		267,5	1031,2	269,7	0,213%
	4%	241,7	1044,3	243,4	0,163%
		266,6	1046,4	267,8	0,115%
	5%	289,2	1023,4	290,2	0,098%
		273	1046,9	274	0,096%

Fonte: Autor (2016)

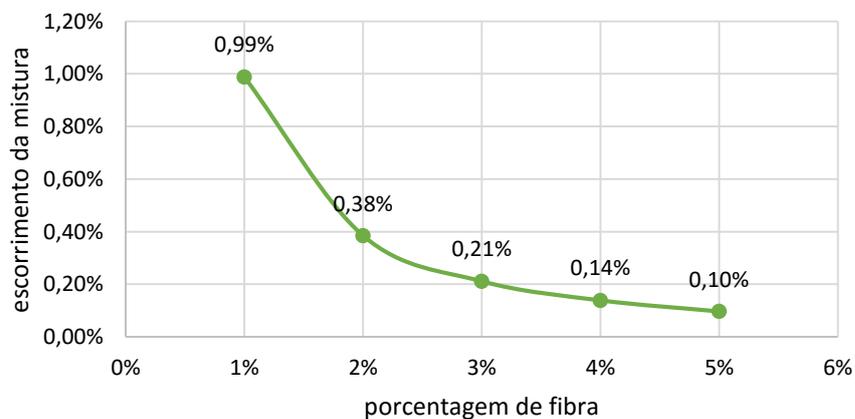
Efetuada-se as médias do escorrimento para cada porcentagem de fibra, pôde-se elaborar o quadro abaixo e relacioná-los pelo gráfico a seguir.

Quadro 17: Média do escorrimento para cada porcentagem de fibra

% DE FIBRA	ESCORRIMENTO MÉDIO
1%	0,99%
2%	0,38%
3%	0,21%
4%	0,14%
5%	0,10%

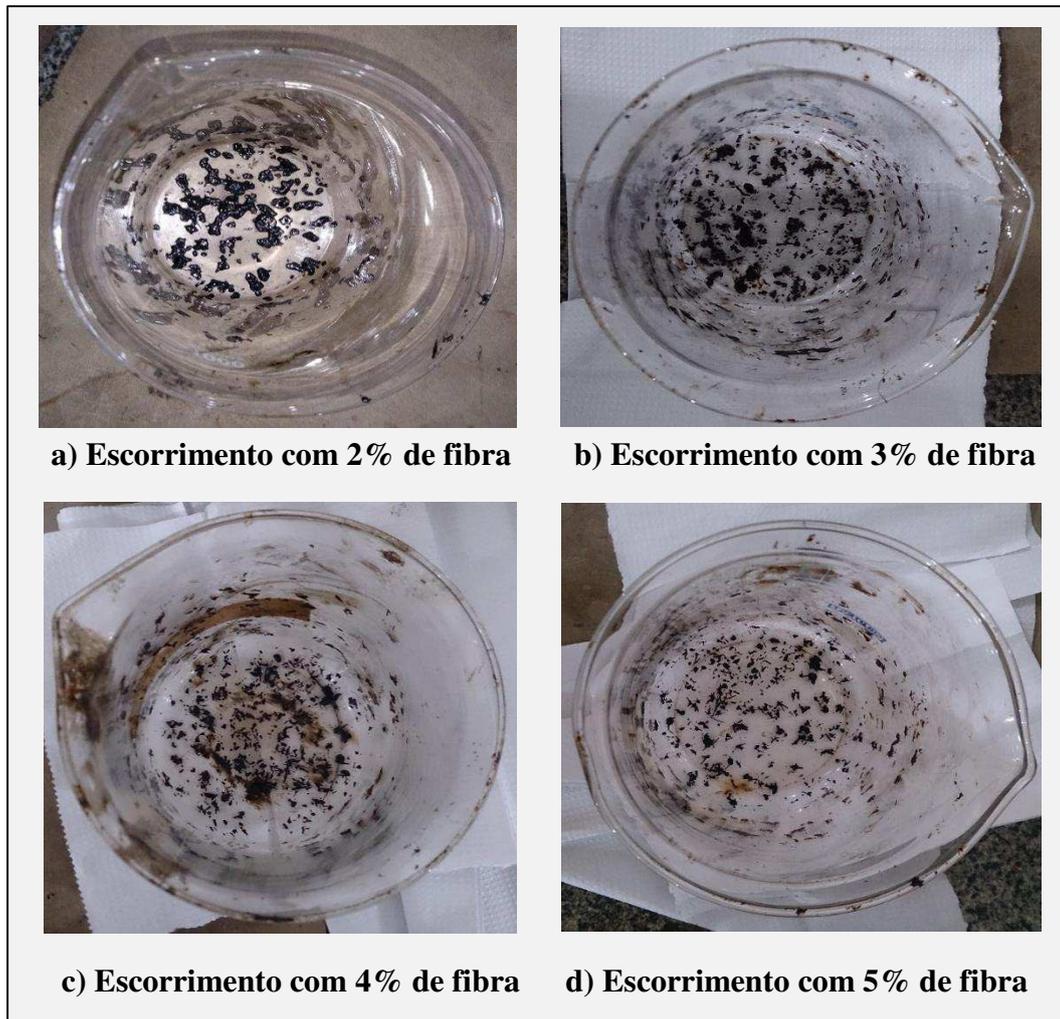
Fonte: Autor (2016)

Gráfico 8: Variação do escorrimento de ligante em função da adição de fibra



Fonte: Autor (2016)

Figura 40: Escorrimento contido nos béqueres após conclusão do ensaio



Fonte: Autor (2016)

A norma AASHTO MP8-01 exige que o escorrimento seja no máximo 0,3%, foi constatado pelo quadro 18 e gráfico 8, que apenas para valores de adição de fibra acima de 2% pôde-se atingir esse objetivo, além do mais pode-se visualizar nos itens b e c da figura 40, uma grande diferença na passagem da adição de 2 para 3% de fibra de babaçu. Além do mais, a figura 40 destaca de forma visual a diferença do escorrimento para cada teor de fibra.

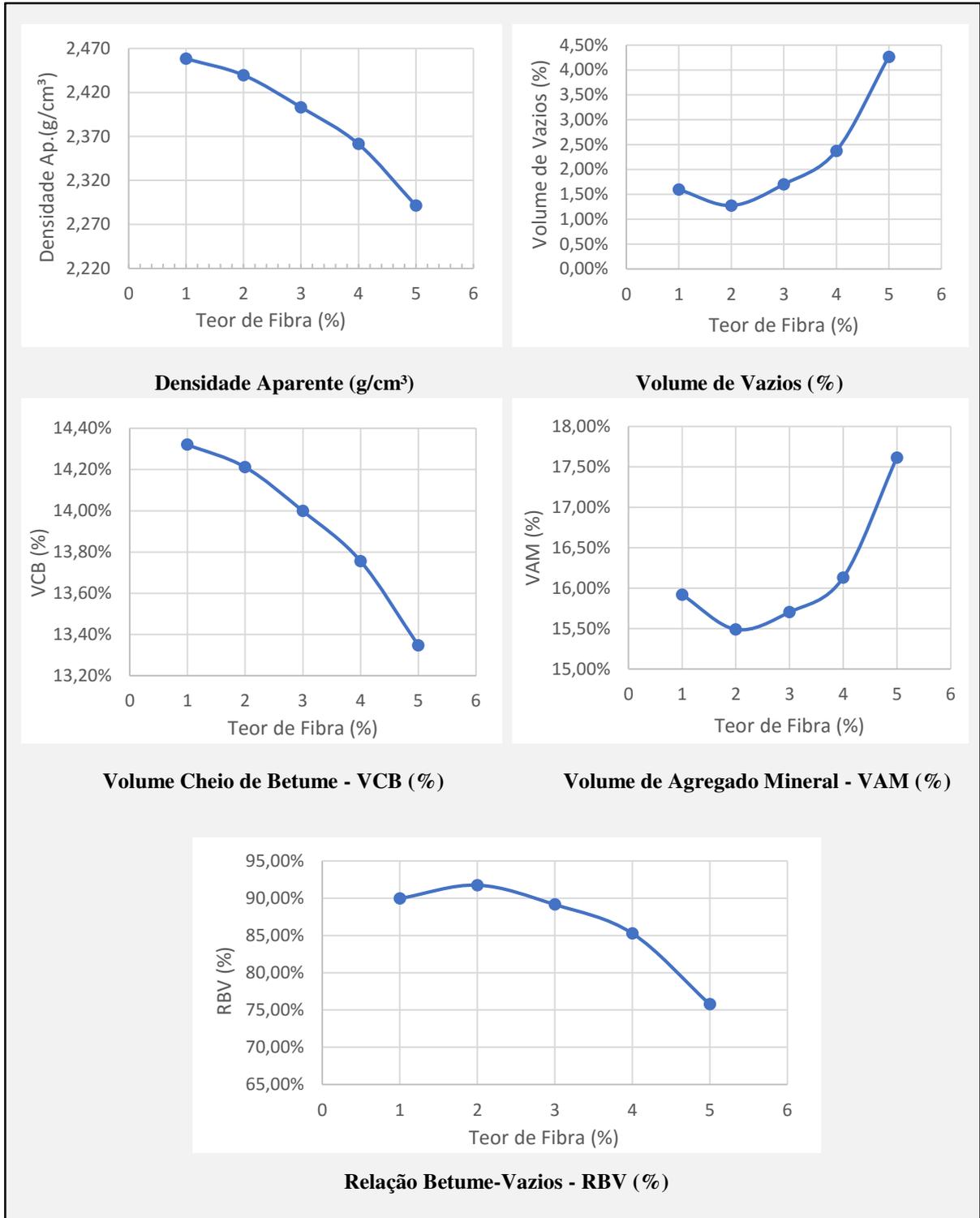
A fibra de babaçu mostrou que mesmo necessitando de porcentagens maiores que as recomendações (quadro 3), se mostrou adequada para se evitar o escorrimento do ligante.

4.3.2 Parâmetros da dosagem Marshall

Com o ensaio de dosagem marshall descrito no item 3.2.3.2, obteve-se parâmetros importantes para a avaliação do desempenho da mistura, com estes pôde-se formar os gráficos a seguir. Que são bastante significativos, tanto na análise da variação

desses parâmetros com o aumento da porcentagem de fibra, quanto na obtenção de um teor ideal de fibra que resulte em propriedades adequadas à norma utilizada.

Figura 41: Parâmetros Marshall da mistura compactada em função do teor de fibras

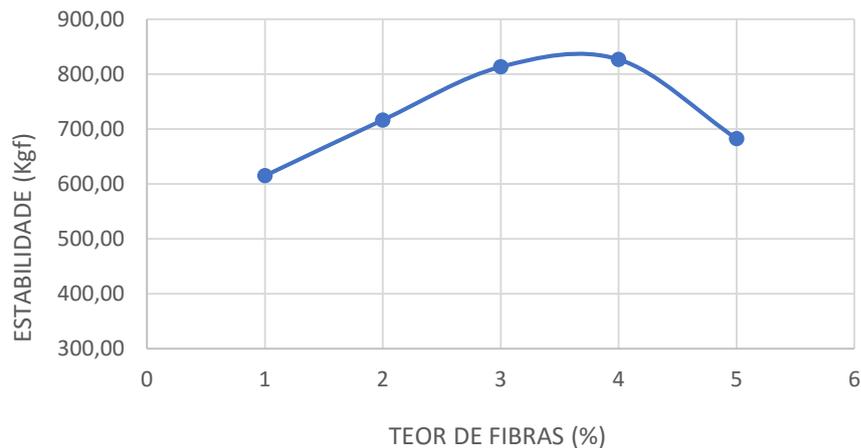


Fonte: Autor (2016)

4.3.3 Estabilidade

O ensaio de estabilidade foi executado de acordo com o procedimento do item 3.2.3.3 seguindo a norma DNER-ME 043/95 e a partir disso, desenvolveu-se o gráfico abaixo, relacionando a estabilidade à variação do teor de fibra.

Gráfico 9: Variação da Estabilidade em função da adição de fibra

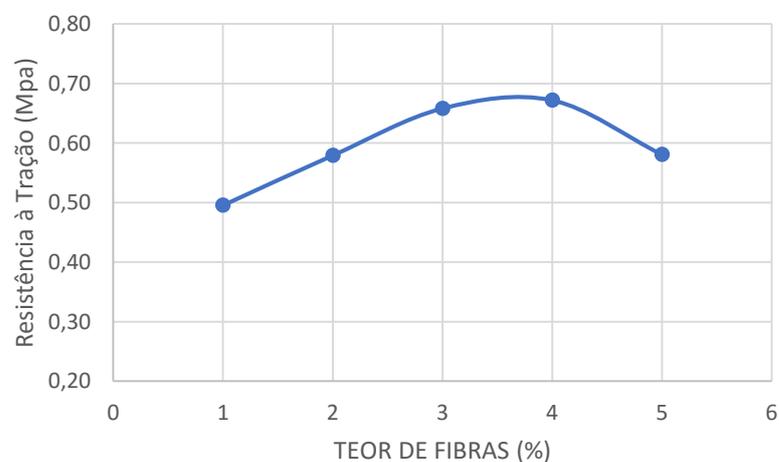


Fonte: Autor (2016)

4.3.4 Resistência à Tração

O ensaio de resistência à tração foi feito de acordo com o procedimento do item 3.2.3.4 seguindo a norma DNIT-ME 136/2010. Segue abaixo o gráfico com o resultado deste ensaio.

Gráfico 10: Variação da resistência à tração em função da adição de fibra



Fonte: Autor (2016)

4.3.5 Teor Ótimo de Fibra

O teor ótimo de fibra foi baseado num valor que atendesse as propriedades exigidas para a mistura SMA descrita na norma AASHTO MP8-01, pois se esperou que esse, fosse apenas um auxiliador que facilitasse atingir os parâmetros dessa mistura.

Uma das exigências da norma citada acima é que a mistura compactada deva possuir um volume de vazios igual a 4%, logo, para se definir o teor de fibra analisou-se o segundo gráfico da figura 41, que relaciona o volume de vazios com o teor de fibra. Constatou-se que para este volume de vazios temos o teor de fibra igual a 4,86%.

Partindo desse valor foram fabricados 6 CP's de acordo com a dosagem Marshall dos quais 3 desses se avaliaram os parâmetros da dosagem Marshall e a estabilidade, e os outros 3 se destinaram à verificação da resistência à tração. Nas tabelas abaixo seguem os resultados dos ensaios.

Quadro 18: Parâmetros Marshall dos CP's com teor ótimo de fibra e 6% de CAP

Densidade aparente (g/cm³)	2,274
Densidade Teórica Máxima (g/cm³)	2,397
Volume de Vazios (%)	5,14%
Volume Cheios com Betume (%)	13,25%
Volume de Agregado Mineral (%)	18,39%
Relação Betume-Vazios (%)	72,04%

Fonte: Autor (2016)

Quadro 19: Estabilidade dos corpos de prova com teor ótimo de fibra

Corpo de prova	CP1	CP2	CP3
d (cm)	10,2	10,2	10,2
h1 (mm)	65,8	66,4	64,8
h2 (mm)	65,8	68,4	64,5
h3 (mm)	67,7	68,9	67,4
h4 (mm)	68,1	66,6	70,3
hmed (mm)	66,85	67,59	66,74
F PRENSA	1,0	1,0	1,0
Fh	0,94	0,93	0,94
EM (kgf)	715,00	818,00	731,00
EM.C (kgf)	673,48	756,81	690,46

Fonte: Autor (2016)

Quadro 20: Fluência dos corpos de prova com teor ótimo de fibra

Corpo de prova	CP1	CP2	CP3
Leitura inicial	9,6	9,5	10,5
Leitura final	19,6	19,1	20,8
Fluência (mm)	10,0	9,6	10,3

Fonte: Autor (2016)

Quadro 21: Resistência à tração dos corpos de prova com teor ótimo de fibra

Corpo de prova	CP4	CP5	CP6
d (cm)	10,2	10,2	10,2
h1 (cm)	6,79	6,72	6,41
h2 (cm)	6,72	6,41	6,50
h3 (cm)	6,66	6,47	6,37
h4 (cm)	6,76	6,83	6,34
hmed (cm)	6,73	6,61	6,40
F (kg)	540,00	730,00	589,00
F (N)	5295,24	7158,38	5775,73
RT (Mpa)	0,49	0,68	0,56

Fonte: Autor (2016)

Quadro 22: Resumo das propriedades do teor ótimo de fibra da mistura estudada

SMA/ Faixa de 25 mm / 6% de CAP / 4,86% de Fibra							
Dap (g/cm³)	Vv (%)	VCB (%)	VAM (%)	RBV (%)	ESTABILIDADE MARSHALL (kgf)	FLUENCIA (mm)	RES. À TRAÇÃO (Mpa)
2,274	5,14%	13,25%	18,39%	72,04%	706,92	10,00	0,58

Fonte: Autor (2016)

4.3.6 Avaliação geral das propriedades da mistura SMA estudada

Com a obtenção de todos os resultados mostrados anteriormente, pôde-se criar um quadro que avaliasse as propriedades da mistura proposta em relação às exigências de mistura SMA na norma AASHTO MP8-01, verificando assim se a mistura apresenta condições adequadas para aplicação.

Quadro 23: Comparação entre os parâmetros da mistura estudada e a os da norma adotada

PARÂMETRO AVALIADO	MISTURA ESTUDADA	PARÂMETROS DA AASHTO MP8-01
TEOR DE CAP (%)	6,0%	Mín. 6,0%
DAP (G/CM³)	2,274	–
VV (%)	5,14%	Igual a 4%
VAM (%)	18,39%	Mín. 17%
ESTAB. MARSHALL (N)	7069,17 N	Mín. 6200 N
FLUENCIA (MM)	10,00 mm	Entre 8 e 16 mm
RES. À TRAÇÃO (MPA)	0,58 Mpa	Mín. 0,6 Mpa

Fonte: Autor (2016)

5 CONCLUSÃO

Finalizados os ensaios e verificados os parâmetros da mistura asfáltica SMA com fibras de babaçu comparou-se os mesmos com a norma adotada no estudo, a AASTHO MP8-01, concluiu-se então que:

- Os agregados graúdos, miúdos e o material de enchimento (fíler) se apresentaram aptos para utilização em misturas SMA, pois adequaram-se às exigências da AASTHO MP8-01, no entanto, a brita 1 mostrou condições insatisfatórias de adesividade ao ligante utilizado;
- O CAP 50/70 fornecido pela usina de asfalto da prefeitura de São Luís, atendeu aos requisitos de penetração, viscosidade Saybolt-Furol e ponto de amolecimento da Nova Especificação Brasileira de Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP) (ANP, 2005);
- As fibras de babaçu apresentaram um baixo poder de absorção, mostrando que apenas para a adição de porcentagens muito maiores do que as propostas pela tabela de recomendação finlandesa, encontrou-se um escorrimento dentro dos padrões exigidos pela AASTHO MP8-01; além do mais, a adição de fibras em grandes porcentagens causou uma maior alteração das propriedades volumétricas e mecânicas da mistura;
- A mistura asfáltica com a porcentagem de fibra ótima atendeu a maioria dos requisitos da principal norma adotada, exceto quanto a resistência à tração e a porcentagem de vazios;
- Os resultados para obtenção da curva de volume de vazios em função da porcentagem de fibras podem ter sofridos alguns erros de procedimento ou operacionais, evidenciando o aumento do volume de vazios da fibra ótima. Acredita-se que o valor de fibra ótima esteja um pouco abaixo de 4,86%, isso resultaria em valores de volume de vazios mais próximos à 4% e valores maiores de resistência à tração;
- O uso de ligante alterado com polímero é muito utilizado em misturas SMA, seu emprego possibilitaria talvez uma mistura que necessitasse de menor porcentagem de fibra e com maior resistência à tração.

Para pesquisas futuras indica-se o uso de agregados que se enquadrem em faixa de menores dimensões da norma AASTHO MP8-01, com emprego de maior porcentagem que 0,5 e 0,7% de fibras de babaçu.

Outras opções de pesquisa seriam:

- O uso de ligante polimerizado na composição da mistura, para melhorias de parâmetros como diminuição das deformações plásticas a alta temperatura, aumento da resistência ao envelhecimento, maior resistência a trincamentos por fadiga, além da diminuição da porcentagem de adição de fibras;
- Buscar a realização de outros ensaios como, o ensaio de dano por umidade induzida, o ensaio de deformação permanente e o módulo de resiliência visando se avaliar o comportamento da mistura SMA com adição de fibras de babaçu, diante da obtenção de novos parâmetros mecânicos para esta.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE TÉCNICAS. **NBR 14950:** Materiais betuminosos - Determinação da viscosidade Saybolt Furol. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

_____. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE TÉCNICAS. **NBR 7809:** Agregado graúdo - Determinação do índice de forma pelo método do paquímetro - Método de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2006.

_____. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE TÉCNICAS. **NBR 7211:** Agregados para concreto - Especificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

_____. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE TÉCNICAS. **NBR 9935:** Agregados - Terminologia. Rio de Janeiro: ABNT, 2011.

_____. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE TÉCNICAS. **NBR 6576:** Materiais asfálticos - Determinação da penetração. Rio de Janeiro: ABNT, 2007.

AGETOP, Agencia Goiana de Transportes e Obras. **Licitação: Restauração da GO-070, Abril. 2014** Disponível em: <<http://www.agetop.go.gov.br/post/ver/176286/licitacao:-restauracao-da-go-0702>>. Acesso em: 15. Jun. 2016.

BALBO, José Tadeu. **Pavimentação Asfáltica: materiais, projetos e restauração.** Oficina de texto, 2007.

BARDINI, Vivian S.S., KLINSKY, Luis M.G., FERNANDES JR. José L. **A importância do fíler para o bom desempenho de misturas asfálticas.** Pesquisa e Tecnologia Minerva. Departamento de Transportes, Escola de Engenharia de São Carlos, USP, São Carlos, 2009.

BERNUCCI, Liedi Bariani et al. **Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros.** Rio de Janeiro: PETROBRAS: ABEDA, 2006.

BIODIESELBR. **Babaçu,** Janeiro. 2006. Disponível em: <<http://www.biodieselbr.com/plantas/babacu/babacu.htm>>. Acesso em: 20.mar.2016.

BLAZEJOWSKI, K. **Stone Matrix Asphalt: theory and practice.** Flórida: Taylor & Francis Group, 2011.

BRASIL. Confederação Nacional de Transporte. **Pesquisa CNT de rodovias 2015:** relatório gerencial. – Brasília: CNT: SEST: SENAT, 2015.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **Cenário Socioeconômico e demanda de energia:** Pesquisa Nacional de Energia 2050. Empresa de Pesquisa Energética – Rio de Janeiro, 2014

BRASIL. Instituto Nacional de Geografia e Estatística. **Quantidade e valor dos produtos da extração vegetal, por produtos, segundo as Grandes Regiões e as Unidades da Federação:** Produção da extração vegetal e da silvicultura, 2014

DNER – DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-ME 078:** Adesividade a ligante betuminoso. Rio de Janeiro DNER, 1994.

_____. **DNER-ME 035:** Agregados - determinação da abrasão “Los Angeles”. Rio de Janeiro, DNER, 1998

_____. **DNER-ME 085:** Material finamente pulverizado - determinação da massa específica real. Rio de Janeiro, DNER, 1994

_____. **DNER-ME 043:** Misturas betuminosas a quente – ensaio Marshall. Rio de Janeiro, DNER, 1995.

_____. **DNER-ME 193:** Produtos betuminosos líquidos e semi-sólidos - determinação da densidade e da massa específica. Rio de Janeiro, DNER, 1996.

_____. **DNER-ME 054:** Equivalente de areia. Rio de Janeiro, DNER, 1997.

_____. **DNER-ME 081:** Agregados – determinação da absorção e da densidade de agregado. Rio de Janeiro DNER, 1998.

_____. **DNER-ME 083:** Agregados – análise granulométrica. Rio de Janeiro DNER, 1998.

_____. **DNER-ME 194:** Agregados - determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco Chapman. Rio de Janeiro, DNER, 1998.

_____. **DNER-ME 367:** Material de enchimento para misturas betuminosas. Rio de Janeiro, DNER, 1997.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 031/2006 – ES:** Pavimentos Flexíveis – Concreto Asfáltico – Especificação de Serviço. Rio de Janeiro, 2006.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 005/2003 – TER:** Defeitos nos pavimentos flexíveis e semirígidos – Terminologia. Rio de Janeiro, 2003.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Manual de pavimentação.** 3.ed. – Rio de Janeiro, 2006.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Manual de Restauração de Pavimentos Asfálticos.** 2. Edição - Rio de Janeiro, 2005.

DNIT - Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. **DNIT 031/2006 - ES:** Pavimentos Flexíveis - Concreto Asfáltico - Especificação de serviço. Rio de Janeiro: DNIT, 2006.

_____. **DNIT-ME 131:** Ponto de amolecimento: método anel e bola – Método de ensaio. Rio de Janeiro: DNIT, 2010.

_____. **DNIT-ME 136:** Pavimentação asfáltica – Misturas asfálticas – Determinação da resistência a tração por compressão diametral – Método de ensaio. Rio de Janeiro: DNIT, 2009.

_____. **DNIT-ME 155: Pavimentação asfáltica – Misturas asfálticas – Ensaio de penetração – Método de ensaio.** Rio de Janeiro: DNIT, 2010.

ECYCLE. **Casca do coco verde pode ser aproveitada para a produção de fibras vegetais,** Fevereiro. 2014. Disponível em: <<http://www.ecycle.com.br/component/content/article/37-tecnologia-a-favor/1439-casca-do-coco-verde-pode-ser-aproveitada-para-a-producao-de-fibras-vegetais-.html>>. Acesso em: 17. Jun.2016.

EN 12697-18: 2004 – **Bituminous mixtures. Test methods for hot mix asphalt.** Part 18: Binder drainage. CEN, European Committee for Standardization, Bruxelas.

EPOCA, **Falta de fiscalização de peso de caminhões custa R\$ 1,6 bilhão por ano ao país,** Abril. 2013. Disponível em: <<http://revistaepoca.globo.com/Brasil/noticia/2013/04/falta-de-fiscalizacao-de-peso-de-caminhoes-custa-r-16-bilhao-por-ano-ao-pais.html>>. Acesso em: 03.jun.2016.

GONÇALVES, Fernando Pugliero. **O Diagnóstico e a Manutenção dos Pavimentos.** Notas de aula – Universidade de Passo Fundo, Rio Grande do Sul, 1999.

GOUVEIA, Lillian Thaís de. **Avaliação do Ensaio de Angularidade do Agregado Fino (FAA) da Especificação Superpave.** Dissertação de Mestrado [Mestrado em Engenharia de Transportes] - Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, 2002.

LOPES, Marcos. **Cominuição de minérios: Etapas de britagem e moagem,** Junho. 2014. Disponível em:<<http://tecnicoemineracao.com.br/etapas-da-cominuicao-de-minerios-britagem-e-moagem/>>. Acesso em: 30. Mai.2016.

MOURA, Edson de. **Classificação de pavimentos e identificação das camadas de pavimento.** Notas de aula – Faculdade de Tecnologia de São Paulo, São Paulo, 2011.

MOURÃO, F. A. L. **Misturas asfálticas de alto desempenho tipo SMA.** Tese de mestrado [Mestrado em Ciências e Engenharia Civil] — Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2003.

NATIONAL ASPHALT PAVEMENT ASSOCIATION (NAPA). **Designing and constructing SMA mixtures: state of the practice.** Quality Improvement Series 122. EUA, 2002.

NEVES FILHO, C. L. D. **Avaliação laboratorial de misturas asfálticas SMA produzidas com ligante asfalto-borracha.** Dissertação de mestrado [Mestrado em Engenharia Civil] – Escola de Engenharia de São Carlos/Universidade de São Paulo, São Carlos, 2004.

PANK, H. **Finnish Asphalt Specifications.** Finnish Pavement Technology Advisory Council, 1995.

RAMOS, Kleberson de Oliveira. **Estudo sobre mistura asfáltica tipo Stone Matrix Asphalt (SMA) para pavimento aeroportuário.** Dissertação de Mestrado [Mestrado em Ciências em Engenharia de Transportes] Instituto Militar de Engenharia – Rio de Janeiro, 2012.

SANTOS, Edimar de Lima dos. **Análise Histórica de Medição de Atrito das Pistas do Aeroporto Santos Dumont – RJ**. Trabalho de Conclusão de Curso. (Graduação) – Instituto Tecnológico de Aeronáutica. São José dos Campos, 2004.

SENÇO, Wlastermiler de. **Manual de Técnicas de Pavimentação**. 2. Edição. Volume 1. São Paulo: Pini, 2007.

TUCHUMANTEL JR, Oswaldo. **O uso de fibras de celulose em pavimentação**, Março. 2013 Disponível em: <<http://www.sinicesp.org.br/materias/2013/bt03a.htm>>. Acesso em: 16. Jun. 2016.

UFPI - UNIVERSIDADE FEDERAL DO PIAUÍ. **Projeto Babcoäll visa potencializar os recursos integrais do coco babaçu**, Julho. 2015. Disponível em: <<http://www.leg.ufpi.br/noticia.php?id=29475>>. Acesso em: 17. Jun. 2016.

VERONEZZI, Felipe. **Refinarias de Petróleo: Entenda como Funcionam**, Janeiro. 2011 Disponível em: <<http://www.guiadacarreira.com.br/atualidades/refinarias-de-petroleo/>> . Acesso em: 31.mai.2016.

VILLIBOR, Douglas Fadul et al. **Pavimentos de Baixo Custo para Vias Urbanas**. 2. Edição. São Paulo: Arte & Ciência, 2009.