

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO MARANHÃO – UEMA  
CENTRO DE CIÊNCIAS TECNOLÓGICAS  
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

IGOR VINICIUS PEREIRA DA SILVA

**ESTUDO DE VIABILIDADE DE MISTURAS ASFÁLTICAS TIPO SMA (STONE  
MATRIX ASPHALT) COM USO DE FIBRAS DE SISAL**

SÃO LUÍS – MA  
2017

IGOR VINICIUS PEREIRA DA SILVA

**ESTUDO DE VIABILIDADE DE MISTURAS ASFÁLTICAS TIPO SMA (STONE  
MATRIX ASPHALT) COM USO DE FIBRAS DE SISAL**

Monografia apresentada à Universidade Estadual  
do Maranhão – UEMA com vistas à obtenção do  
grau de bacharel em Engenharia Civil.

Orientadora: Prof.<sup>a</sup> Dra. Maria Teresinha de  
Medeiros Coelho

SÃO LUÍS – MA

2017

Silva, Igor Vinicius Pereira da.

Estudo de viabilidade de misturas asfálticas tipo SMA (Stone Matrix Asphalt) com uso de fibras de sisal / Igor Vinicius Pereira da Silva. – São Luís, 2017.

121 f.

Monografia (Graduação) – Curso de Engenharia Civil, Universidade Estadual do Maranhão, 2017.

Orientador: Prof<sup>ª</sup>. Dra. Maria Teresinha de Medeiros Coelho.

1. SMA. 2. Fibras de sisal. 3. Angularidade do agregado fino. 4. Escorrimento do ligante. I. Título.

CDU 625.85:677.162

**IGOR VINICIUS PEREIRA DA SILVA**

**ESTUDO DE VIABILIDADE DE MISTURAS ASFÁLTICAS TIPO SMA  
(STONE MATRIX ASPHALT) COM USO DE FIBRAS DE SISAL**

Monografia apresentada à Universidade  
Estadual do Maranhão – UEMA com vistas à  
obtenção do grau de bacharel em  
Engenharia Civil.

Data de aprovação: 04/12/2017

**BANCA EXAMINADORA**



---

**Prof.ª Dra. Maria Teresinha de Medeiros Coelho**  
Doutora em Urbanismo  
Universidade Estadual do Maranhão



---

**Prof. Walter Canales Sant'Ana**  
Doutor em Engenharia de transportes  
Universidade Estadual do Maranhão



---

**Prof. Anderson Nascimento Silva**  
Universidade Estadual do Maranhão

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por permitir que eu chegasse até aqui, com sua graça e misericórdia me proporcionou esta oportunidade.

Aos meus pais e, especialmente, a minha mãe Dilma, pela mulher guerreira que és, por ser o meu exemplo de determinação, por sempre ter lutado, acreditado e confiado em mim, por todo apoio, ajuda, encorajamento e suporte sempre que precisei. Ao meu pai e melhor amigo Tony, por sempre me incentivar e me aconselhar sabiamente nos momentos mais importantes.

Aos meus familiares, padrinhos e amigos da família por sempre acreditar em mim e torcer para que esse sonho fosse um dia possível.

A minha namorada Leticia, com toda sua paciência, atenção, carinho e ajuda durante o desenvolvimento deste trabalho.

A minha orientadora Prof.<sup>a</sup> Dra. Maria Teresinha por toda sua ajuda, suporte e atenção, além dos ensinamentos passados em sala de aula.

Aos professores Dr. Walter Canales e Anderson Nascimento pelas sugestões, dicas, ajuda e conhecimento proporcionado ao longo do curso.

Aos meus amigos de longa data, em especial Fernando Barbosa, Matheus Monier, Lucas Pacheco, Júnior Dallagnol, Gabriel Lamar, Igor Murad, Klailson cutrim, Clara Alencar, Amanda Noronha e os demais do Dom Bosco por sempre acreditarem em mim e me incentivarem.

Ao meu amigo e parceiro de trabalho Lucas Vasconcelos, pelos diversos momentos compartilhados juntos na vida social, acadêmica e profissional.

A Ducol Engenharia Ltda., em especial aos engenheiros civis Teixeira e Jorge Luiz, pela oportunidade de estágio, pelo conhecimento e tudo que me fora ensinado.

Aos amigos adquiridos ao longo do curso, em especial Thais torres, Vanessa Bessa, Raissa Catossi, João Rolim, Gabriel Borges, Daniel Nogueira, Guilherme Teles, Erickson, André Luís e todos os demais.

Ao professor Hernandes Paiva do Instituto Federal do Maranhão, por viabilizar a utilização do triturador, fundamental para o desenvolvimento da pesquisa.

A Universidade Estadual do Maranhão pela oportunidade de cursar a Engenharia Civil, com suas instalações e laboratórios fizeram possível a realização deste trabalho.

*“Conhecimento sem transformação não é sabedoria.”*

Paulo Coelho

## RESUMO

O presente estudo tem como principal objetivo verificar se há a possibilidade de incorporação de fibras de sisal em misturas asfálticas tipo SMA (Stone Matrix Asphalt). Em linhas gerais, o SMA caracteriza-se por apresentar uma maior durabilidade, uma grande porcentagem de agregados graúdos, uma macrotextura superficial - que proporciona uma maior segurança e conforto ao rolamento dos veículos, além de ter um bom desempenho quanto a estabilidade a altas temperaturas e flexibilidade a baixas temperaturas. As vantagens quanto ao uso da fibra de sisal dizem respeito a sua abundância no Brasil, facilidade do cultivo da planta que a origina, ser proveniente de uma fonte renovável, além de ser uma fibra leve, de alto módulo e resistência específica. O desenvolvimento desta pesquisa partiu da caracterização e estudo dos materiais em laboratório, destacando-se dois ensaios fundamentais: a angularidade do agregado fino e o escorrimento do ligante. Os ligantes utilizados para a mistura foram o CAP 50/70 e o asfalto-borracha (ECOFLEX B). Depois de conhecidos os materiais e verificadas às especificações para estes, definiu-se um traço de trabalho e moldaram-se os corpos de prova. A análise destes foi feita com base nas especificações para o SMA, conforme a AASHTO MP8-01 e, após de avaliados os parâmetros volumétricos e as propriedades mecânicas da mistura, concluiu-se que é possível utilizar a fibra de sisal em misturas SMA, visto que os valores obtidos satisfizeram aos limites exigidos da norma.

Palavras-chave: SMA. Fibras de sisal. Angularidade do agregado fino. Escorrimento do ligante.

## **ABSTRACT**

The present study has as main objective to verify if there is the possibility of incorporation of sisal fibers in asphalt mixtures type SMA (Stone Matrix Asphalt). In general terms, the SMA is characterized by greater durability, a large percentage of large aggregates, a superficial macrotexture - which provides greater safety and comfort to the rolling of vehicles, as well as having a good performance in terms of stability at high temperatures and flexibility at low temperatures. The advantages regarding the use of sisal fiber have related to its abundance in Brazil, ease of cultivation of the plant that originates it, comes from a renewable source, besides being a light fiber, high modulus and specific resistance. The development of this research it based on the characterization and study of the materials in the laboratory, highlighting two important tests: the angularity of the fine aggregate and the draindown of the binder. The binders used for the blend were CAP 50/70 and asphalt rubber (ECOFLEX B). After the materials were known and verified the specifications for these, a work trace was defined and the specimens were molded. The analysis of these was made based on the specifications for the SMA, according to AASHTO MP8-01 and, after evaluating the volumetric parameters and the mechanical properties of the mixture, it was concluded that it is possible to use sisal fiber in SMA mixtures, that the values obtained have met the required limits of the standard.

Keywords: SMA. Sisal fibers. Angularity of the fine aggregate. Draindown of the binder.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Distribuição dos carregamentos no pavimento flexível. ....	24
Figura 2 – Estrutura ilustrativa do pavimento flexível. ....	25
Figura 3 – Distribuição dos carregamentos no pavimento rígido. ....	26
Figura 4 – Estrutura ilustrativa do pavimento rígido.....	26
Figura 5 – Estrutura ilustrativa do pavimento semirrígido. ....	27
Figura 6 – Classificação quanto a distribuição dos grãos. ....	31
Figura 7 – Comparação entre CAUQ, CPA e SMA. ....	35
Figura 8 – 2006: SMA aplicado na BR 277 - Paraná.....	36
Figura 9 – Representação da composição da mistura do SMA. ....	37
Figura 10 – Escorrimento do ligante em um SMA sem fibras. ....	42
Figura 11 – Plantação de sisal. ....	44
Figura 12 – Fibra de sisal antes do tratamento. ....	47
Figura 13 – Escorrimento para a fibra triturada manualmente. ....	48
Figura 14 – Trituramento mecânico da fibra. ....	48
Figura 15 – Fibra de sisal após o tritramento mecânico. ....	49
Figura 16 – Sequência de peneiras para o ensaio de granulometria. ....	51
Figura 17 – Ensaio de resistência à abrasão Los Angeles. ....	52
Figura 18 – Execução do ensaio de absorção.....	53
Figura 19 – Amostras após mistura antes da imersão em água destilada.....	54
Figura 20 – Determinação das dimensões do agregado. ....	55
Figura 21 – Ensaio de angularidade do agregado fino (FAA). ....	57
Figura 22 – Ensaio de equivalente de areia. ....	58
Figura 23 – Determinação do volume deslocado (Vd).....	59
Figura 24 – Frasco Chapman com as amostras de ensaio.....	60
Figura 25 – Determinação da massa específica do cimento Portland pelo Frasco Le Chatelier.....	61
Figura 26 – Determinação da densidade real pelo método do picnômetro. ....	63
Figura 27 – Execução do ensaio de penetração. ....	64
Figura 28 – Execução do ensaio de viscosidade Saybolt-Furol.....	66
Figura 29 – Ensaio de ponto de amolecimento. ....	67
Figura 30 – Ensaio de escorrimento.....	68
Figura 31 – Pesagem e separação dos agregados para mistura. ....	70

Figura 32 – Aquecimento dos materiais para mistura.....	70
Figura 33 – Mistura dos materiais. ....	71
Figura 34 – Compactação e desmoldagem dos CP's.....	71
Figura 35 – Determinação da densidade aparente.....	72
Figura 36 – Estabilidade Marshall. ....	74
Figura 37 – Prensa Marshall utilizada para determinação da estabilidade, fluência e resistência à tração. ....	74
Figura 38 – Molde de compressão diametral para determinação da resistência à tração. ....	75
Figura 39 - Saturação e envolvimento dos CP's com filme e saco plástico para congelamento.....	77
Figura 40 - Execução do ensaio Lottman. ....	78
Figura 41 – Ensaio de adesividade após as 72 horas. ....	84

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Especificações para a mistura SMA. ....	36
Tabela 2 - Especificações do agregado graúdo para o SMA segundo a AASHTO MP8-01.....	37
Tabela 3 - Faixas granulométricas alemã para o SMA. ....	38
Tabela 4 - Faixas granulométricas norte-americana para o SMA conforme a AASHTO MP8-01. ....	38
Tabela 5 - Especificações do agregado miúdo para o SMA segundo a AASHTO MP8-01.....	39
Tabela 6 - Recomendações finlandesas para adição de fibras em misturas asfálticas tipo SMA em relação ao peso total da mistura ligante agregado. ....	42
Tabela 7 - Características exigidas para as fibras orgânicas (celulose). ....	43
Tabela 8 - Características da fibra de sisal utilizada no estudo. ....	49
Tabela 9 - Classificação da forma das partículas (ABNT NBR 6954/1989). ....	55
Tabela 10 - Frações do agregado fino para preparo da amostra de ensaio. ....	56
Tabela 11 - Temperaturas de mistura e compactação para o ECOFLEX B.....	64
Tabela 12 - Temperaturas de mistura e compactação. ....	69
Tabela 13 - Resumo da granulometria dos agregados.....	81
Tabela 14 - Traços de agregados segundo a faixa de 19 mm da AASHTO MP8-01. .....	82
Tabela 15 - Resultados da resistência à abrasão a Los Angeles. ....	83
Tabela 16 - Resultados da absorção.....	83
Tabela 17 - Resultados da angularidade.....	84
Tabela 18 - Resultados do equivalente de areia. ....	85
Tabela 19 - Resultados das massas específicas dos materiais.....	85
Tabela 20 - Caracterização do ECOFLEX B. ....	86
Tabela 21 - Resultado do ensaio de penetração. ....	86
Tabela 22 - Resultados da viscosidade Saybolt-Furol.....	88
Tabela 23 - Resultado para o ponto de amolecimento. ....	88
Tabela 24 - Escorrimento para o CAP 50/70. ....	89
Tabela 25 - Escorrimento para o ECOFLEX B. ....	89
Tabela 26 - Resultados dos parâmetros volumétricos e densidades para 6% de	

CAP 50/70.....	90
Tabela 27 - Resultados dos parâmetros volumétricos e densidades para 6,5% de CAP 50/70.....	90
Tabela 28 - Resultados dos parâmetros volumétricos e densidades para 7% de CAP 50/70.....	91
Tabela 29 - Resultados da estabilidade, fluência e resistência à tração para o CAP 50/70.....	91
Tabela 30 - Resultados dos parâmetros volumétricos e densidades para 7,5% de CAP 50/70.....	92
Tabela 31 - Resultados dos parâmetros volumétricos e densidades para 8% de CAP 50/70.....	92
Tabela 32 - Resultados da estabilidade e fluência para 7,5% de CAP 50/70. ....	93
Tabela 33 - Resultados da estabilidade e fluência para 8% de CAP 50/70. ....	93
Tabela 34 - Resultados dos parâmetros volumétricos para o teor de projeto do CAP 50/70.....	94
Tabela 35 - Resultados da estabilidade, fluência e resistência à tração para o teor de projeto do CAP 50/70. ....	94
Tabela 36 - Resultados dos parâmetros volumétricos e densidades para 6% de ECOFLEX B.....	96
Tabela 37 - Resultados dos parâmetros volumétricos e densidades para 6,5% de ECOFLEX B. ....	97
Tabela 38 - Resultados dos parâmetros volumétricos e densidades para 7% de ECOFLEX B. ....	97
Tabela 39 - Resultados da estabilidade, fluência e resistência à tração para o ECOFLEX B.....	97
Tabela 40 - Resultados do ensaio Lottman.....	100
Tabela 41 - Traços das misturas.....	100
Tabela 42 - Análise dos resultados do SMA estudado. ....	101
Tabela 43 - Comparação de resultados 1: SMA com diferentes agentes estabilizadores. ....	102
Tabela 44 - Comparação de resultados 2: SMA com diferentes agentes estabilizadores. ....	102
Tabela 45 - Índice de forma. ....	112
Tabela 46 - Angularidade pó de brita. ....	114

Tabela 47 - Angularidade areia 1. ....	114
Tabela 48 - Angularidade areia 2. ....	114
Tabela 49 - Angularidade areia 3. ....	114
Tabela 50 - Densidade real do pó de brita. ....	114
Tabela 51 - Densidade real da areia 1. ....	115
Tabela 52 - Densidade real da areia 2. ....	115
Tabela 53 - Cálculo do equivalente de areia. ....	116
Tabela 54 - Resultado das massas específicas pelo método do cesto. ....	117
Tabela 55 - Massa específica do pó de brita pelo frasco Chapman ....	117
Tabela 56 - Massa específica do fíler pelo frasco Le Chatelier. ....	117
Tabela 57 - Massa específica da fibra de sisal pelo método do picnômetro. ....	117
Tabela 58 - Escorrimento para 6% de CAP 50/70. ....	118
Tabela 59 - Escorrimento para 6,5% de CAP 50/70. ....	118
Tabela 60 - Escorrimento para 7% de CAP 50/70. ....	118
Tabela 61 - Escorrimento para 7% de ECOFLEX B. ....	119
Tabela 62 - Resultados da estabilidade e fluência para 6% de CAP. ....	120
Tabela 63 - Resultados da estabilidade e fluência para 6,5% de CAP. ....	120
Tabela 64 - Resultados da estabilidade e fluência para 7% de CAP. ....	120
Tabela 65 - Resultados da resistência à tração para 6% de CAP. ....	120
Tabela 66 - Resultados da resistência à tração para 6,5% de CAP. ....	121
Tabela 67 - Resultados da resistência à tração para 7% de CAP. ....	121
Tabela 68 - Resultados da estabilidade e fluência para 6% de ECOFLEX B. ....	122
Tabela 69 - Resultados da estabilidade e fluência para 6,5% de ECOFLEX B. ....	122
Tabela 70 - Resultados da estabilidade e fluência para 7% de ECOFLEX B. ....	122
Tabela 71 - Resultados da resistência à tração para 6% de ECOFLEX B. ....	122
Tabela 72 - Resultados da resistência à tração para 6,5% de ECOFLEX B. ....	123
Tabela 73 - Resultados da resistência à tração para 7% de ECOFLEX B. ....	123

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Granulometria da brita 1. ....	79
Gráfico 2 - Granulometria da brita 0. ....	80
Gráfico 3 - Granulometria do pó de brita. ....	80
Gráfico 4 - Granulometria do fíler. ....	81
Gráfico 5 - Granulometria da mistura. ....	82
Gráfico 6 - Viscosidade Saybolt-Furol. ....	87
Gráfico 7 - Determinação do teor de CAP de projeto. ....	93
Gráfico 8 - Determinação da estabilidade para o teor de CAP de projeto.....	95
Gráfico 9 - Curvas das densidades aparentes e máximas teóricas. ....	95
Gráfico 10 - Curvas dos parâmetros volumétricos VAM e RBV.....	96
Gráfico 11 - Curvas das densidades aparentes e máximas teóricas para o ECOFLEX B. ....	98
Gráfico 12 - Curvas do volume de vazios e estabilidade Marshall para o ECOFLEX B. ....	98
Gráfico 13 - Curvas dos parâmetros volumétricos VAM e RBV para o ECOFLEX B. ....	99
Gráfico 14 - Determinação do número de golpes para o ensaio Lottman. ....	99

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

°C	Graus Celsius
%	Porcentagem
#	Peneira
AASHTO	American Association Of State Highway and Transportation Officials
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ADP	Asfalto Diluído de Petróleo
AMP	Asfalto Modificado por Polímero
ANIP	Associação Nacional da Indústria de Pneumáticos
CAP	Cimento Asfáltico de Petróleo
CA	Concreto Asfáltico
CAUQ	Concreto Asfáltico Usinado a Quente
CBUQ	Concreto Betuminoso Usinado a Quente
Cm	Centímetro
Cm <sup>3</sup>	Centímetro cúbico
CNT	Confederação Nacional do Transporte
CPA	Camada Porosa de Atrito
CP's	Corpos de prova
DER	Departamento de Estradas de Rodagem
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
EA	Equivalente de areia
EAP	Emulsão Asfáltica de Petróleo
EM	Especificação do material
FAA	Fine Aggregate Angularity
FHWA	Federal Highway Administration
g	Gramas
h	Hora
Km	Quilômetro
Kgf	Quilogramas força
LSP	Laboratório de Solos e Asfalto
ME	Método de ensaio

ml	Mililitro
mm	Milímetro
Min	Minutos
Máx	Máximo
Mín	Mínimo
Mpa	Mega pascal
N	Newton
Nº	Número
NAPA	National Asphalt Pavement Association
NBR	Norma Brasileira
RBV	Relação Betume Vazios
SMA	Stone Matrix Asphalt
SSF	Segundos Saybolt-Furol
TWG	Technical Work Group
UEMA	Universidade Estadual do Maranhão
VAM	Vazios do Agregado Mineral
VCB	Vazios com Betume
Vv	Volume de Vazios

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>19</b>
<b>1.1 Título</b> .....	<b>20</b>
<b>1.2 Objetivos</b> .....	<b>20</b>
1.2.1 Objetivo Geral .....	20
1.2.2 Objetivos Específicos .....	21
<b>1.2 Justificativa</b> .....	<b>21</b>
<b>2 REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....	<b>22</b>
<b>2.1 Breve Histórico da Pavimentação</b> .....	<b>22</b>
<b>2.2 Aspectos gerais acerca do pavimento</b> .....	<b>23</b>
<b>2.3 Classificação dos pavimentos</b> .....	<b>24</b>
2.3.1 Pavimento flexível .....	24
2.3.2 Pavimento rígido .....	25
2.3.3 Pavimento semirrígido.....	26
<b>2.4 Revestimentos asfálticos</b> .....	<b>27</b>
2.4.1 Agregados.....	28
2.4.2 Ligantes asfálticos.....	31
2.4.3 Stone Matrix Asphalt (SMA) .....	33
<b>3 METODOLOGIA</b> .....	<b>46</b>
<b>3.1 Pesquisa bibliográfica</b> .....	<b>46</b>
<b>3.2 Fibra de sisal</b> .....	<b>47</b>
<b>3.3 Ensaio laboratoriais</b> .....	<b>50</b>
3.3.1 Ensaio nos agregados minerais .....	50
3.3.2 Ensaio no ligante asfáltico .....	63
3.3.3 Ensaio na mistura asfáltica.....	67
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	<b>79</b>
<b>4.1 Resultados dos ensaios nos agregados</b> .....	<b>79</b>

4.1.1 Granulometria .....	79
4.1.2 Resistência à abrasão “Los Angeles” .....	83
4.1.3 Absorção.....	83
4.1.4 Adesividade .....	83
4.1.5 Índice de forma .....	84
4.1.6 Angularidade do agregado fino (FAA) .....	84
4.1.7 Equivalente de areia.....	85
4.1.8 Massa específica .....	85
<b>4.2 Resultados dos ensaios no ligante asfáltico .....</b>	<b>86</b>
4.2.1 Ensaio de penetração .....	86
4.2.2 Ensaio de viscosidade Saybolt-Furol.....	87
4.2.3 Ensaio de ponto de amolecimento .....	88
<b>4.3 Resultados dos ensaios na mistura asfáltica .....</b>	<b>88</b>
4.3.1 Ensaio de escorrimento.....	88
4.3.2 Dosagem Marshall .....	90
4.3.3 Ensaio Lottman .....	99
4.3.4 Discussões dos resultados e comparação com outros estudos similares.....	100
<b>5 CONCLUSÃO.....</b>	<b>104</b>
<b>5.1 Recomendações para pesquisas futuras .....</b>	<b>105</b>
<b>6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>107</b>
<b>APÊNDICE A – ÍNDICE DE FORMA .....</b>	<b>112</b>
<b>APÊNDICE B - ANGULARIDADE E DENSIDADE REAL .....</b>	<b>114</b>
<b>APÊNDICE C – EQUIVALENTE DE AREIA .....</b>	<b>116</b>
<b>APÊNDICE D – MASSAS ESPECÍFICAS .....</b>	<b>117</b>
<b>APÊNDICE E – ESCORRIMENTO DO CAP 50/70.....</b>	<b>118</b>
<b>APÊNDICE F – ESCORRIMENTO DO ECOFLEX B.....</b>	<b>119</b>
<b>APÊNDICE G – PROPRIEDADES MECÂNICAS (CAP 50/70) .....</b>	<b>120</b>

<b>APÊNDICE H – PROPRIEDADES MECÂNICAS (ECOFLEX B).....</b>	<b>122</b>
---	------------

## 1 INTRODUÇÃO

A realidade da malha rodoviária nacional é crítica no que tange a pavimentação das vias e a qualidade destas. O último Boletim Estatístico da Confederação Nacional do Transporte – CNT, realizado em fevereiro de 2017, revela que dos 1.721.088,7 km de rodovias de todo o país, apenas 211.418,4 km são pavimentadas, o que totaliza cerca de somente 12,3% do total. Ainda há o fato de que nem todo este percentual de vias pavimentadas estão em boas condições.

O último anuário CNT do transporte divulgada neste ano de 2017, em sua segunda edição, apresenta diversos dados estatísticos acerca da infraestrutura de transportes. No que diz respeito à infraestrutura rodoviária e, mais precisamente ao pavimento, na última avaliação realizada no ano de 2016, dos 103.259 km avaliados, exatos 49.898 km (48,3%) foram classificados entre regular, ruim e péssimo, ratificando que o cenário da malha rodoviária é crítico, uma vez que quase metade desta não oferece boas condições de trafegabilidade.

Quando se trata do Maranhão, o mesmo anuário revela que, de acordo com o último levantamento realizado no ano de 2015, a malha rodoviária maranhense possui extensão total de 58.133,9 km. Destes, apenas 6.829,9 km estão pavimentados (cerca de 11,7%) e, de acordo com a classificação do pavimento referente a 2016, dos 4.551 km avaliados, exatos 2.830 km estão entre regular, ruim e péssimo, o que representa, aproximadamente, 68,2%.

Diante desta situação, é indiscutível a necessidade da recuperação das vias comprometidas e investimento na qualidade dos futuros pavimentos a serem executados. Não se aterá neste trabalho em questionar as razões as quais levaram a este cenário, contudo, sugere-se a utilização de outro revestimento asfáltico que, diferentemente dos que são usados comumente, oferece maior durabilidade, proporcionando um adiamento de uma intervenção de reabilitação e a redução da necessidade de manutenção, sendo este, então, o SMA.

Portanto, segundo Neves Filho (2004), o SMA (Stone Matrix Asphalt), quando comparado às demais misturas asfálticas convencionais, possui maior resistência à reflexão de trincas por fadiga, à deformação permanente (devido o contato pedra-pedra) e ao desgaste (devido a maior espessura da película de asfalto). A mistura é composta por uma elevada porcentagem de agregado graúdo -

o que deixa um grande volume de vazios, sendo então preenchidos por um mástique asfáltico.

O mástique presente no SMA é composto por uma mistura de areia, fíler, ligante asfáltico e fibras. O objeto desse estudo, portanto, é investigar por meio de ensaios laboratoriais a viabilidade em se utilizar a fibra de sisal na mistura.

O sisal é uma fibra vegetal, logo, também de celulose, e que conforme Leocádio (2005, p.15) é proveniente da planta do sisal, da espécie *Agave Sisalana*, sendo uma das fibras mais utilizadas no mundo, caracterizada pelo fácil cultivo em regiões semiáridas, cujos maiores produtores, no Brasil, são os estados da Paraíba e Bahia. Além disso, o sisal é amplamente utilizado na indústria de cordoaria (cordas, tapetes, cordéis etc.) e, na construção civil, são encontradas na composição de massas para a fabricação de forros de gesso, podendo ser utilizadas, também, no polimento de revestimentos cerâmicos.

Assim, os resultados dos estudos vistos ao final desta pesquisa mostram que a fibra de sisal pode ser incorporada a misturas asfálticas tipo SMA. Essa análise de viabilidade se faz com base nas especificações para este tipo de mistura, visto que os valores obtidos dos parâmetros volumétricos e mecânicos atendem aos limites exigidos.

## **1.1 Título**

Análise de desempenho de misturas asfálticas tipo SMA (Stone Matrix Asphalt) com uso de fibras de sisal.

## **1.2 Objetivos**

Neste ponto são apresentados os objetivos da pesquisa em questão, partindo-se do mais amplo e abrangente aos mais específicos.

### **1.2.1 Objetivo Geral**

Estudar o comportamento da fibra de sisal em misturas asfálticas tipo SMA e verificar se há a possibilidade de incorporar esta fibra como agente estabilizador.

### 1.2.2 Objetivos Específicos

- Analisar a influência da fibra de sisal no escorrimento do ligante em misturas asfálticas com o CAP 50/70 e asfalto-borracha (ECOFLEX B);
- Analisar as propriedades volumétricas e mecânicas da mistura asfáltica em questão;
- Sugerir um traço para mistura SMA com fibras de sisal;
- Comparar os resultados com outros estudos similares que abordaram o SMA com diferentes agentes estabilizadores.

### 1.2 Justificativa

O cenário da malha rodoviária brasileira é deficiente no que toca a rodovias pavimentadas e a qualidade destas, uma vez que menos de 13% encontra-se pavimentada. Como visto, de acordo com pesquisas da CNT, quase 50% destas que estão pavimentadas são classificadas entre regulares, ruins e péssimas. Não obstante, as rodovias maranhenses evidenciam perfeitamente esta realidade caótica. Assim, é irrefutável que há uma carência de investimento em quantidade e qualidade no setor de infraestrutura rodoviária. Portanto, com vistas à utilização de um revestimento asfáltico mais resistente e duradouro, este trabalho estudará o SMA, uma vez que atende satisfatoriamente tal necessidade.

Assim, propõe-se utilizar na mistura do SMA fibras de sisal, de modo que ao longo do trabalho, será analisada a viabilidade do uso desta. Para tanto, serão levadas em consideração as propriedades volumétricas e mecânicas do revestimento, com o intuito de, ao final, verificar se há possibilidade do seu uso e como se comporta em misturas asfálticas do tipo SMA.

## **2 REFERENCIAL TEÓRICO**

Para o desenvolvimento desta pesquisa, foi necessário percorrer diversos conceitos teóricos os quais pudessem corroborar ao entendimento do trabalho em questão. Assim, é necessário conhecer a essência da pavimentação desde os primórdios das sociedades e desenvolvimento das primeiras estradas, bem como os pavimentos de modo geral, os principais revestimentos asfálticos e, mais precisamente, tudo o que se refere ao SMA e a fibra de sisal – os quais são os principais focos deste estudo.

### **2.1 Breve Histórico da Pavimentação**

Quando se trata da história da pavimentação, é indiscutível citar que ela está atrelada a história da humanidade, uma vez que o desenvolvimento das sociedades com o povoamento dos continentes, conquistas territoriais, intercâmbios comerciais, culturais, religiosos só foram viabilizados graças a construção de diversas estradas. Pode-se então ressaltar diferentes civilizações e impérios que se destacaram com suas estradas. Dentre eles, destacam-se os Egípcios – que para a construção das pirâmides foi necessário construir vias com lajões justapostos em base com boa capacidade de suporte. Outra estrada histórica que merece ser citada é a chamada Estrada da Seda - uma das rotas de comércio mais antigas e importantes devido a sua grande influência nas culturas da China, Índia, Ásia e também do Ocidente. Além dessas, uma das mais importantes são as Vias Romanas, como a via Ápia - que ligava Roma a Cápua, tendo 195 km e que permitiu o exército Romano se locomover rapidamente, sendo construída sobre estrado de pranchas de madeira e na sua superfície eram utilizadas pedras grandes (BERNUCCI et al., 2006).

No Brasil, ainda segundo Bernucci et al. (2006), uma das primeiras estradas reportadas tem início em 1560, à época do terceiro governador geral no Brasil, Mem de Sá. Trata-se do caminho aberto para ligar São Vicente ao Planalto Piratininga, que mais tarde fora nomeada Estrada do Mar (ou Caminho do Mar) e, hoje, é conhecida como Estrada Velha do Mar.

Assim, destaca-se a primeira experiência de expressivo porte no país durante o século XX, a qual nessa mesma estrada do Caminho do mar foi

empregada amplamente misturas asfálticas em sua maior extensão. Fora isso, destacava-se das demais devido suas extensões pavimentadas e as condições geométricas gerais da rodovia, bem como a existência de registros precisos sobre a obra. Nessa época era comum a execução de camadas de macadame hidráulico ou betuminoso sobre os subleitos, processo este que ficou bastante conhecido pela expressão “macadamizar”. Assim, é de fundamental relevância ressaltar que há outros registros, até mais antigos, com o emprego de macadame hidráulico - como a construção da Avenida Paulista em 1903; e de misturas asfálticas – como a rua 24 de Maio em 1910, todas em São Paulo (BALBO, 2007).

## **2.2 Aspectos gerais acerca do pavimento**

Segundo o DNIT (2006, p. 95), “Pavimento de uma rodovia é a superestrutura de camadas de espessuras finitas, assentes sobre um semi-espaço considerado teoricamente como infinito – a infraestrutura ou terreno de fundação, a qual é designada subleito”.

O Pavimento é uma estrutura não perene, composta por camadas sobrepostas de diferentes materiais compactados a partir do subleito do corpo estradal, adequada para atender estrutural e operacionalmente ao tráfego, de maneira durável e ao mínimo custo possível, considerados diferentes horizontes para serviços de manutenção preventiva, corretiva e de reabilitação, obrigatórios (BALBO, 2007, p.35).

Além disso, a qualidade do pavimento das rodovias tem impacto direto no desempenho do transporte rodoviário e na economia do Brasil. De acordo com a CNT, uma rodovia com más condições do pavimento aumenta o custo operacional do transporte, reduz o conforto e a segurança dos passageiros e das cargas, além de causar prejuízos ambientais, visto que o transporte rodoviário é responsável pelo tráfego de, aproximadamente, 90% dos passageiros e de mais de 60% das cargas que circulam no país.

Assim, conforme Balbo (2007, p.15):

Pavimentar uma via de circulação é obra civil que enseja, antes de tudo, a melhoria operacional para o tráfego, na medida em que é criada uma superfície mais regular (garantia de melhor conforto no deslocamento do veículo), uma superfície mais aderente (garantia de mais segurança em condições de pista úmida ou molhada), uma superfície menos ruidosa diante da ação dinâmica dos pneumáticos (garantia de melhor conforto

ambiental em vias urbanas e rurais), seja qual for a melhoria física oferecida.

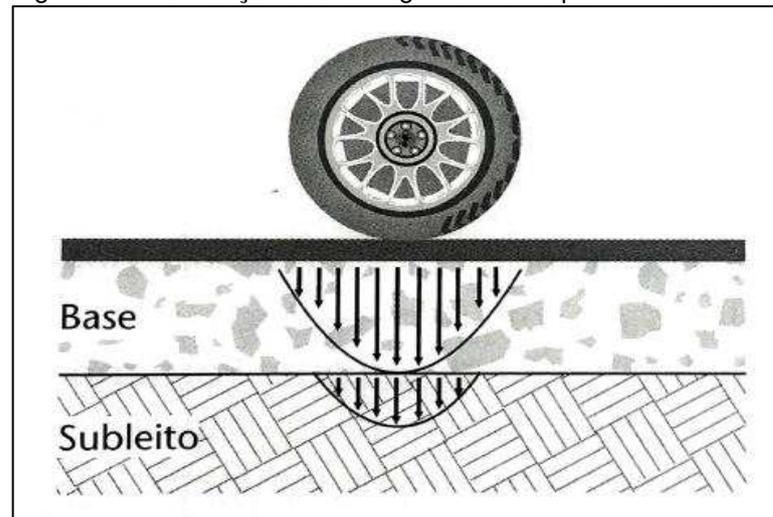
## 2.3 Classificação dos pavimentos

Os pavimentos rodoviários classificam-se de acordo com as suas características estruturais cujos materiais empregados proporcionam, podendo ser: flexíveis, rígidos e semirrígidos. Neste ponto será discutido acerca das características de cada um do ponto de vista estrutural e funcional, dando maior ênfase aos flexíveis, sendo este o alvo do presente estudo.

### 2.3.1 Pavimento flexível

Os pavimentos ditos flexíveis são aqueles os quais as deformações, até certo limite, não levam ao rompimento (Figura 1). Além disso, são dimensionados normalmente a compressão e a tração na flexão, provocada pelo aparecimento das bacias de deformação sob as rodas dos veículos, que levam a deformações permanentes, e ao rompimento por fadiga (SENÇO, 2007, p.23).

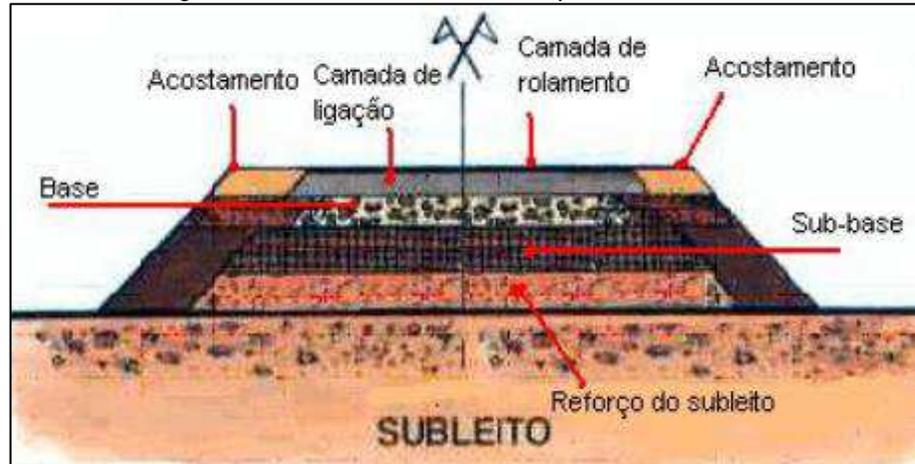
Figura 1 – Distribuição dos carregamentos no pavimento flexível.



Fonte: Senço (2007)

Este tipo de pavimento é formado por quatro camadas principais: revestimento asfáltico, base, sub-base e reforço do subleito, conforme a Figura 2.

Figura 2 – Estrutura ilustrativa do pavimento flexível.



Fonte: Andrade (2005)

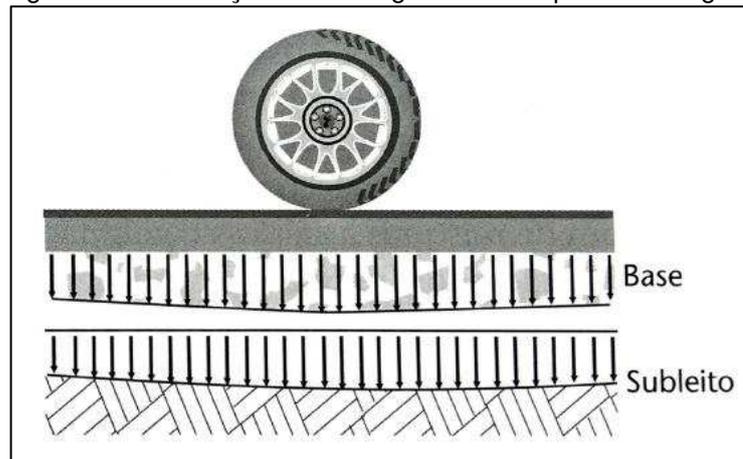
O revestimento asfáltico é a camada superior destinada a resistir diretamente às ações do tráfego e transmiti-las de forma atenuada as camadas inferiores, além disso, desempenha a função de impermeabilizar o pavimento e melhorar as condições de rolamento. Certas vezes, pode ser composto por duas camadas: a primeira é a mais superficial, chamada camada de rolamento - que fica em contato direto com as rodas dos veículos, a segunda é uma camada intermediária ou de ligação - também chamada de binder (BERNUCCI et al., 2006).

Logo após o revestimento asfáltico, há a camada de base, sub-base e reforço do subleito (Figura 2). Os esforços verticais oriundos dos veículos que são descarregados no revestimento são distribuídos adequadamente ao longo destas camadas até chegar ao subleito. Ainda de acordo com Bernucci et al. (2006), os materiais empregados nestas camadas podem ser solos, mistura de solos, agregados e, se necessário, outros materiais combinados a estes (cimento, cal, emulsão asfáltica etc.).

### 2.3.2 Pavimento rígido

Para Senço (2007, p.23), “Pavimentos rígidos são aqueles pouco deformáveis, constituídos principalmente de concreto de cimento. Rompem por tração na flexão, quando sujeitos a deformações” (Figura 3).

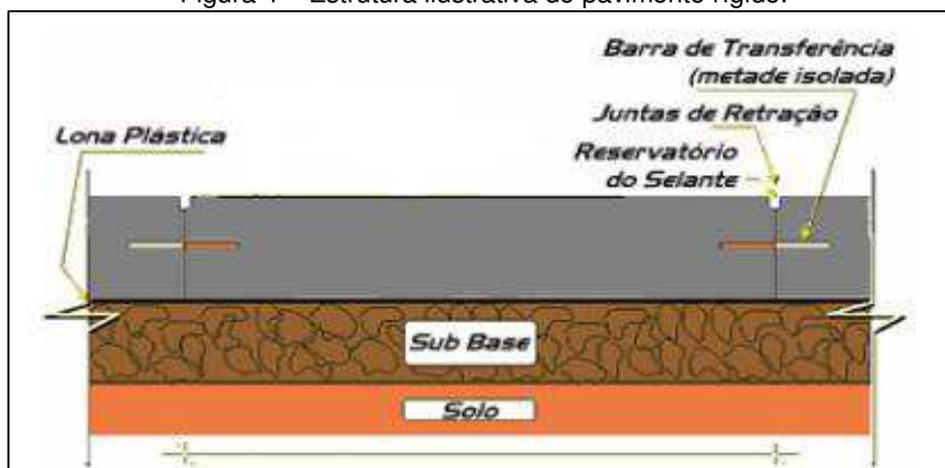
Figura 3 – Distribuição dos carregamentos no pavimento rígido.



Fonte: Senço (2007)

Segundo Júnior (2014), as placas de concreto do pavimento rígido acumulam um duplo papel, atuam ao mesmo tempo como base e revestimento. Portanto, sob as placas de concreto, em regra, não há camada de base, mas apenas de sub-base – normalmente de concreto rolado, posto que não pode apresentar expansibilidade nem ser bombeável (Figura 4).

Figura 4 – Estrutura ilustrativa do pavimento rígido.

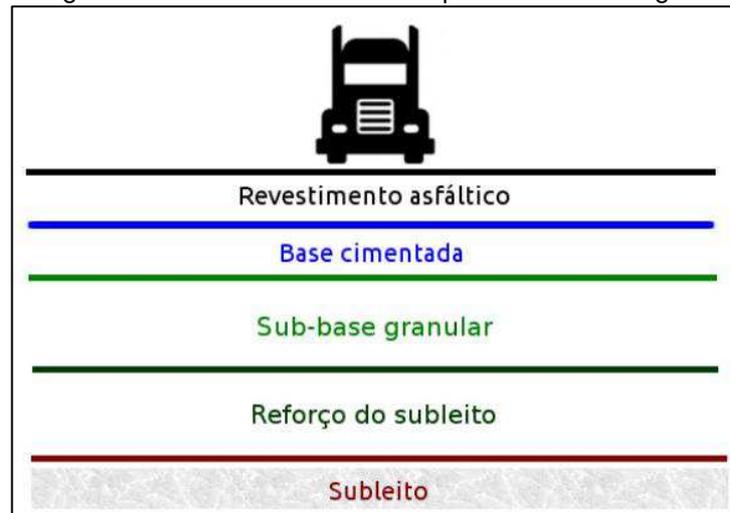


Fonte: Andrade (2005)

### 2.3.3 Pavimento semirrígido

O pavimento semirrígido está ilustrado na Figura 5 e, caracteriza-se por possuir uma base cimentada com algum aglutinante com propriedades cimentícias. A exemplo, cita-se uma camada de solo cimento revestida por uma camada asfáltica (DNIT, 2006).

Figura 5 – Estrutura ilustrativa do pavimento semirrígido.



Fonte: E-Civil (2017)

## 2.4 Revestimentos asfálticos

Os revestimentos asfálticos são constituídos através da associação de agregados e materiais betuminosos. A associação desses materiais pode ser feita por penetração ou por mistura. A primeira pode ocorrer de duas maneiras: penetração invertida – nesta os revestimentos são executados através da aplicação do material betuminoso seguida de idêntico número de operações de espalhamento e compressão de camadas de agregados com granulometrias apropriadas; penetração direta – nesta os revestimentos são executados através do espalhamento e compactação dos agregados com granulometria apropriada seguida da aplicação de material betuminoso, recebendo ainda uma última camada de aplicação de agregado fino (DNIT, 2006).

Nos revestimentos concebidos por mistura, ainda segundo o DNIT (2006), o agregado é pré-envolvido com o material betuminoso antes da compactação. A mistura pode ser feita em usina fixa – ditos “Pré-misturados”, ou na própria pista – ditos “Pré-misturados na pista”. Além disso, a mistura pode ser feita a frio – quando os agregados e os ligantes permitem que o espalhamento seja feito à temperatura ambiente, ou a quente – quando o ligante e o agregado são misturados e espalhados na pista ainda quentes. Para Bernucci et al. (2006), as misturas usadas ainda podem ser separadas quanto à distribuição granulométrica em: densas, abertas, contínuas e descontínuas. A seguir será brevemente comentado acerca das misturas asfálticas usadas a quente mais utilizadas no Brasil.

Dentre estas, destaca-se o Concreto Asfáltico Usinado a Quente (CAUQ) ou Concreto Asfáltico Denso (CA), também muito designado como CBUQ – Concreto Betuminoso Usinado a Quente. Acredita-se ser o mais tradicional e utilizado no território nacional. Conforme Bernucci et al. (2006), o CAUQ é uma mistura muito resistente, com volume de vazios (Vv) após a compactação em torno de 3% a 5% para camada de rolamento e 4% a 6% para camadas intermediárias. A faixa de teor de asfalto em peso usual está normalmente entre 4,5% a 6%, RBV entre 75% a 82% para camada de rolamento e 65% a 72% para camada de ligação.

Outro revestimento asfáltico comumente utilizado é o AAUQ – Areia Asfalto Usinado a Quente, sendo empregados em rodovias de tráfego não muito elevado. A mistura é composta por agregado miúdo, em geral areia, ligante (CAP), e fíler se necessário. Destaca-se um maior consumo de ligante se comparados às misturas convencionais devido ao aumento da superfície específica (BERNUCCI et al., 2006).

As misturas asfálticas abertas chamadas CPA – Camada Porosa de Atrito surgiram como uma evolução do conceito de concreto asfáltico. Trata-se de um tipo de revestimento que tem como principal funcionalidade proporcionar uma alta drenagem na superfície da capa asfáltica, o que evita a formação de poças e combatem o “spray d’água” causados pelos veículos em dias chuvosos. Tal mistura apresenta uma elevada porcentagem de vazios, em torno de 18% a 25%, justificando sua alta porosidade (BALBO, 2007).

Há ainda uma opção de revestimento que se caracteriza por ter uma graduação descontínua densa, o Gap-graded. De acordo com Bernucci et al. (2006), esta mistura trabalha com uma faixa granulométrica especial a qual resulta em uma macrotextura superficial aberta ou rugosa, mas que não possui teor de vazio elevado e, sua utilização tem sido empregada como camada estrutural.

Quanto ao alvo deste estudo, o SMA, será abordado adiante minuciosamente e com mais detalhes.

#### 2.4.1 Agregados

Os agregados podem ser entendidos como conjuntos de grãos minerais, dentro de determinados limites de dimensões, naturais ou artificiais, britados ou não, utilizados na construção civil, notavelmente na fabricação de argamassas, concreto asfálticos e de cimento Portland, misturas estabilizadas com ligantes etc. No ramo da construção pesada de vias de

transporte, são de notável aplicação na fabricação de diversas camadas que compõem estruturas de pavimentos e lastros de vias férreas (BALBO, 2007, p.96).

Portanto, os agregados desempenham fundamental papel em uma mistura asfáltica, sendo necessário, então, um estudo preciso acerca das suas propriedades a fim de que seja garantido um bom desempenho do revestimento. Para tanto, prospectando garantir a qualidade do agregado são realizados diversos ensaios os quais serão abordados no item 3.3.1, assegurando que os requisitos de durabilidade, resistência a abrasão, adesividade ao ligante, porosidade, dentre outros, sejam atendidos.

A classificação dos agregados é feita de acordo com sua origem, tamanho e distribuição dos grãos.

#### *2.4.1.1 Quanto à origem*

A origem dos agregados pode ser: natural, artificial e reciclado. Conforme Balbo (2007):

- Natural – os agregados ditos naturais são aqueles encontrados na crosta terrestre resultantes de diversos processos geológicos, sendo obtidos até sua forma final com ou sem necessidade de uma série de processos para viabilização de uso;
- Artificial – os agregados artificiais são aqueles provenientes de rejeitos industriais, particularmente associados às indústrias siderúrgicas (como a escória). Deve-se ressaltar que a utilização desses agregados na produção de bases granulares, concretos e de misturas asfálticas devem atender às mesmas especificações básicas para os agregados naturais, além de outras exigências específicas;
- Reciclado – os agregados reciclados são oriundos de entulhos de demolição e de construção, bem como de produtos de fresagem de pavimentos existentes.

#### 2.4.1.2 Quanto ao tamanho

Os agregados quando classificados a partir do tamanho de seus grãos, subdividem-se em: graúdo, miúdo e material de enchimento ou filer. Assim, de acordo com Bernucci et al. (2006):

- Graúdo – é o material que fica retido na peneira N° 10, ou seja, é aquele com dimensões maiores do que 2,0 mm (britas, cascalhos, seixos etc.);
- Miúdo – é o material que passa na peneira N° 10 e fica retido na peneira N° 200, ou seja, é aquele com dimensões menores do que 2,0 mm e maiores que 0,075 mm (areias, pó de pedra etc.);
- Material de enchimento (fíler) – é o material onde pelo menos 65% das partículas é menor do que 0,075 mm, ou seja, passam na peneira N° 200 (cal hidratada, cimento Portland etc.).

#### 2.4.1.3 Quanto à distribuição dos grãos

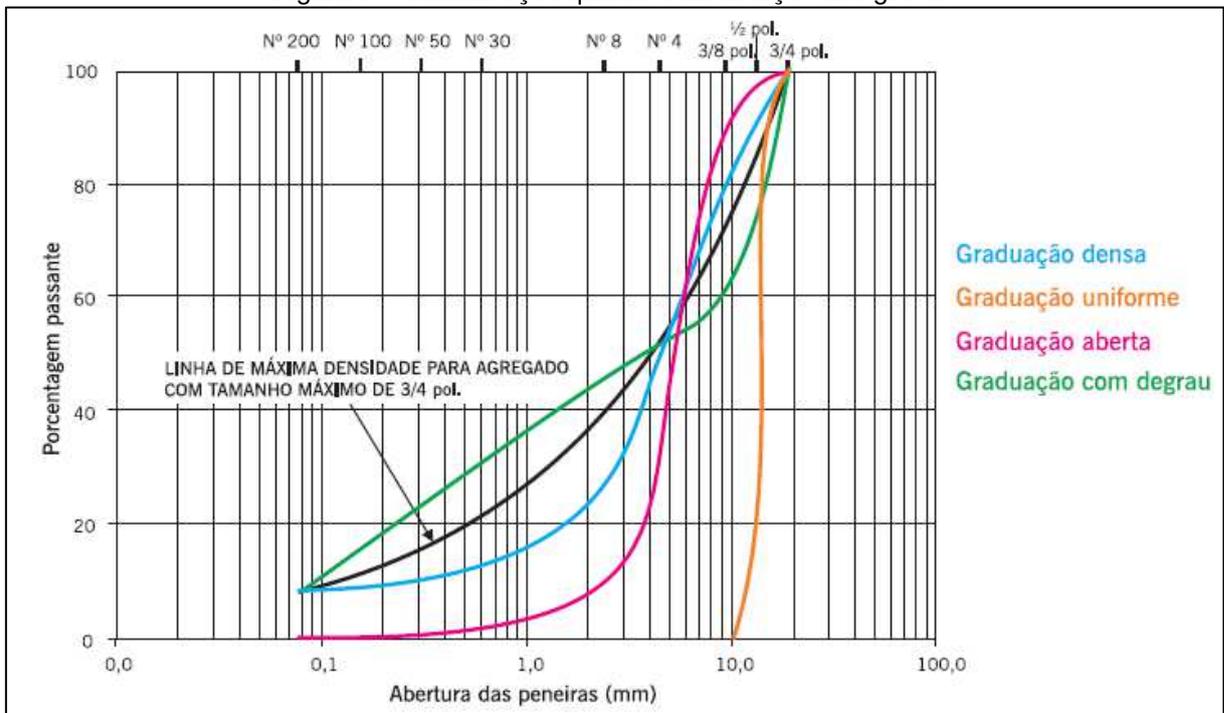
A classificação dos agregados quanto a distribuição dos grãos parte da granulometria destes e, segundo Balbo (2007, p.100), “A curva de distribuição granulométrica dos agregados é representada pela relação entre a porcentagem passante em uma dada peneira e o logaritmo de sua respectiva abertura [...]”.

Assim, as graduações subdividem-se em: densa, aberta, uniforme e descontínua (Figura 6). De acordo com Bernucci et al. (2006):

- Graduação densa – também chamada de bem-graduada, é aquela que apresenta distribuição granulométrica contínua, próxima a de densidade máxima;
- Graduação aberta – é aquela que apresenta distribuição granulométrica contínua, contudo, com pouca quantidade de material fino (menor do que 0,075 mm) para preencher os vazios entre as partículas maiores, resultando em um maior volume de vazios;
- Graduação uniforme – é aquela que apresenta a maioria de suas partículas com tamanhos em uma faixa bastante estreita, o que a deixa bastante íngreme;

- Graduação descontínua – também chamada de graduação com degrau, é aquela que apresenta pequena porcentagem de agregados com tamanho intermediário, o que forma um patamar na curva granulométrica em função das frações intermediárias.

Figura 6 – Classificação quanto a distribuição dos grãos.



Fonte: Bernucci et al. (2006)

#### 2.4.2 Ligantes asfálticos

O asfalto é um produto natural (presente em rochas ou em depósitos lacustres) ou derivado do petróleo, constituídos essencialmente de betumes. Os betumes são substâncias compostas por hidrocarbonetos pesados, com propriedades ligantes, inflamáveis, de elevada viscosidade em temperatura ambiente, e que ocorrem na natureza ou são obtidos por fabricação, a partir da destilação de petróleo, de carvão, de madeira e de resinas (BALBO, 2007, p.109).

Quando o asfalto se enquadra em uma determinada classificação particular, de acordo com determinadas propriedades físicas as quais assegurem o bom desempenho do material na obra, ele passa a ser denominado comumente pela sigla CAP – Cimento Asfáltico de Petróleo (BERNUCCI et al., 2008).

Para Vicentini (2015), o CAP é um produto formado a partir do resíduo do refinamento do petróleo cru (ou bruto) e, é a base para todos os outros subprodutos derivados do petróleo que são utilizados na pavimentação (como o ADP, EAP e AMP). Possui grande quantidade de betume, coloração negra ou marrom escuro, sendo muito viscoso, de propriedades ligantes e de consistência sólida a semissólida em temperatura ambiente. Além disso, trata-se de um material termoplástico, de comportamento reológico complexo, dependente da temperatura, que com o intemperismo se altera, perdendo suas propriedades iniciais, tornando-se mais viscoso e frágil.

Mourão (2003) ressalta que o CAP é um material adequado para aplicação em trabalhos de pavimentação, uma vez que além de suas propriedades aglutinantes e impermeabilizantes, possui características de flexibilidade, durabilidade e alta resistência à ação da maioria dos produtos inorgânicos.

O CAP é classificado conforme sua penetração (ensaio que será discutido no item 3.3.2.1), de maneira que os números presentes no tipo de CAP referem-se à própria penetração que esse ligante apresenta. Assim, os principais tipos de CAP utilizados no Brasil são: 50-70, 85-100, 100-120 e 150-200, sendo o primeiro destes o mais utilizado no Maranhão.

#### *2.4.2.1 Asfalto-borracha*

Em face à crescente preocupação com as questões ambientais e destino dos resíduos, o asfalto-borracha demonstra ser uma alternativa bastante eficiente no que toca à destinação final da borracha de pneus.

De acordo com a ANIP (2001 apud BERNUCCI et al., 2006), no Brasil, são colocados no mercado cerca de 61 milhões de pneus por ano, sendo que em torno de 38 milhões são resultado da produção nacional e 23 milhões são pneus reaproveitados, usados importados ou recauchutados.

Segundo Balbo (2007), a forma mais elaborada de incorporar a borracha é triturá-la finamente (com diâmetro menor do que 2 mm) e previamente misturá-la com CAP, o que é feito a quente (temperatura próxima a 200°C) em tanques, com auxílio de elevado esforço mecânico de cisalhamento, sendo o tempo de reação da mistura entre 20 min e 120 min, dependendo de inúmeras condições.

Para Bernucci et al. (2006), este método é chamado de processo úmido (wet process) – que resulta ao final no “Asfalto-borracha” e, em serviços de pavimentação, são utilizados em misturas asfálticas do tipo CA, SMA, CPA, tratamentos superficiais, podendo ainda serem utilizados para selagem de trincas e de juntas. Neste processo, o pó de pneu representa em geral 15% a 20% da massa do CAP ou menos que 1,5 % da massa total da mistura. Há ainda um outro método, o processo seco (dry process). Neste, a borracha triturada entra como parte do agregado pétreo na mistura e juntamente com o ligante asfáltico dá origem ao produto “agregado-borracha” ou concreto asfáltico modificado com adição de borracha. Deve-se utilizá-lo apenas em misturas asfálticas a quente (concreto asfáltico convencional ou com granulometria especial descontínua – Gap-graded, por exemplo).

De acordo com Neves Filho (2004), o uso do asfalto-borracha no revestimento melhora o desempenho dos pavimentos mediante o aumento da rigidez a elevadas temperaturas (reduzindo a deformação permanente nas trilhas de roda), aumenta a flexibilidade (retardando o aparecimento de trincas) e aumenta a impermeabilização proporcionada pelos revestimentos asfálticos.

#### 2.4.3 Stone Matrix Asphalt (SMA)

O SMA (Stone Matrix Asphalt), traduzido do inglês como “Matriz Pétreo Asfáltica”, é uma mistura asfáltica descontínua de maior durabilidade se comparada aos revestimentos convencionais, geralmente utilizada em rodovias de alto tráfego, aeroportos ou em áreas de grande solicitação do pavimento. De acordo com a NAPA (2002), o SMA é uma mistura flexível, estável, resistente a afundamentos de trilha de roda que tem no contato entre grãos o responsável por sua resistência, e no mástique a durabilidade da mistura.

Assim, nesta seção será discutida acerca das principais características deste tipo de revestimento asfáltico, desde a composição da mistura, bem como suas aplicações e vantagens. Para tanto, inicialmente será discorrido sobre alguns aspectos históricos deste revestimento.

##### 2.4.3.1 Breve histórico do SMA

Segundo Neves Filho (2004), na década de 60, na Alemanha, o ministério de transportes esteve em busca de uma solução para o problema da deterioração da superfície dos pavimentos asfálticos causada pelo uso de pneus com pregos durante o inverno. Assim, foram utilizadas, inicialmente, misturas asfálticas com maior teor de betume (cerca de 25%, em peso), que tinham uma alta resistência ao desgaste, porém eram desvantajosas, pois requereriam trabalho manual, eram caras e, certas vezes, produziam um revestimento não homogêneo. Assim, conforme Lanchas (1999 apud NEVES FILHO, 2004), optou-se por utilizar uma maior quantidade de agregados graúdos e um teor de ligante em torno de 7%, contudo, apresentava escorrimento do ligante. Após diversas tentativas, em 1968, uma construtora alemã utilizou fibras como um aditivo estabilizante, sendo então aplicado o primeiro revestimento SMA (com 2 cm de espessura) em Wilhelmshaven, na Alemanha.

Após ser bem-sucedido na Alemanha, o SMA alcançou diversos países da Europa, como Dinamarca, Noruega, Polônia, Finlândia, Bélgica, Hungria e Portugal. De acordo com os dados do documento “Heavy Duty Surfaces – the arguments for SMA”, publicado em 1998 pela EAPA (European Asphalt Pavement Association), em 1996, a Alemanha apresentava uma extensão de 28.600 Km de pista simples com SMA, o que correspondia a mais de 100 milhões de metros quadrados, enquanto a Espanha apresentava 69 milhões de metros quadrados, seguidos por Suécia com 50 milhões de metros quadrados, Holanda e França com 32 e 18 milhões de metros quadrados, respectivamente (NEVES FILHO, 2004).

Acredita-se que o SMA tenha chegado na América do Norte em 1990, no Canadá, mais precisamente em Ontário. Nos Estados Unidos, neste mesmo ano, chegou como resultado do “European Asphalt Study Tour”, que foi uma viagem à Europa dos pesquisadores da área da pavimentação dos EUA. No início de 1991, a FHWA – órgão americano que administrava as rodovias, estabeleceu o TWG (Technical Work Group) - uma equipe técnica para desenvolver um guia para materiais e execução de misturas do tipo SMA (NAPA, 2002).

No Brasil o SMA foi introduzido pioneiramente em São Paulo na pista do autódromo de Interlagos, em fevereiro de 2000 (BELIGNI et al., 2000 apud BERNUCCI et al, 2006).

Conforme Reis (2002), em agosto de 2001 foi construído um trecho experimental de SMA na curva mais fechada e perigosa da Via Anchieta, rodovia que liga São Paulo a Santos e que, para Bernucci et al. (2006) mostrou grande

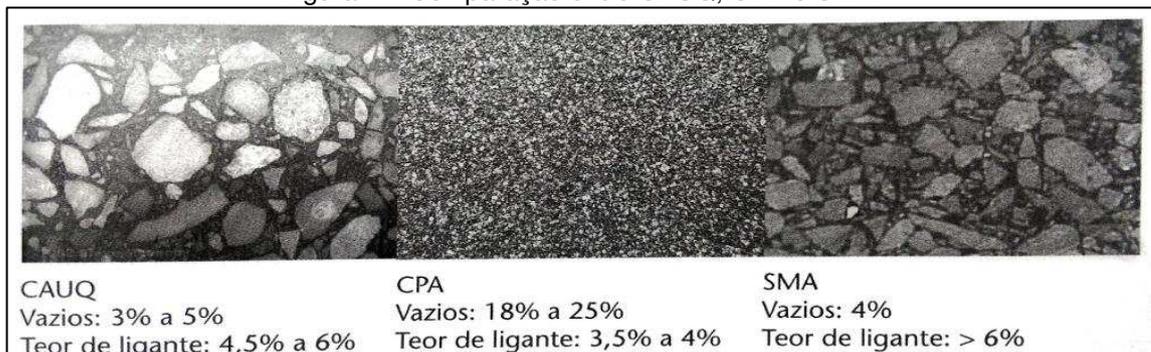
sucesso e superioridade de comportamento funcional e estrutural em relação a outras soluções asfálticas até então empregadas.

#### 2.4.3.2 Aspectos gerais do SMA

O SMA trata-se de um revestimento asfáltico a quente, concebido para maximizar o contato entre os agregados graúdos, aumentando a interação grão/grão e a resistência à ação do tráfego. A mistura se caracteriza por conter uma porcentagem de agregados graúdos, geralmente 70% a 80% maior que 4,75 mm. Devido a esta particular graduação, forma-se um grande volume de vazios entre os agregados graúdos, os quais são preenchidos por uma massa constituída pela mistura de fração areia, fíler, ligante asfáltico e fibras. A fração areia é essencialmente de material britado (REIS, 2002).

Se comparado a misturas asfálticas convencionais, o SMA apresenta uma distribuição granulométrica com mais agregados graúdos e muito pouco finos (Figura 7), sendo então necessário uma cubicidade maior dos agregados britados para que após a compactação apresente grande contato face a face. Além disso, devido a própria ausência de finos em quantidade na mistura, possui uma textura superficial rugosa, o que proporciona uma espécie de rede de microdrenagem superficial, evitando assim a formação de lâminas finas d'água durante períodos chuvosos, favorecendo, também, a uma maior aderência e contato dos pneus com os agregados superficiais (BALBO, 2007).

Figura 7 – Comparação entre CAUQ, CPA e SMA.



Fonte: Balbo (2007)

De acordo com Bernucci et al. (2006), o SMA geralmente é aplicado em espessuras variando entre 1,5 cm a 7 cm, dependendo da faixa granulométrica. Possui um consumo de ligante em geral entre 6,0% a 7,5%.

Para a NAPA (2002), a principal vantagem do SMA é a longa vida útil proporcionada pela melhor performance deste revestimento em relação a misturas asfálticas convencionais, o que, a longo prazo, reduz os custos com recuperação e reabilitação do pavimento. Outra vantagem que se pode citar é a redução do ruído ao rolamento dos veículos, além de melhorar a visibilidade e o atrito com a superfície do revestimento (Figura 8).

Figura 8 – 2006: SMA aplicado na BR 277 - Paraná.



Fonte: DER Paraná (2008)

Quanto a mistura propriamente dita, a AASHTO MP8-01 (apud BLAZEJOWSKI, 2011) exige algumas especificações, conforme mostra a Tabela 1.

Tabela 1 - Especificações para a mistura SMA.

<b>Propriedades</b>	<b>Especificação</b>
Teor de asfalto (%)	6,0 mín
Volume de vazios (%)	4,0
VAM (%)	17,0 mín
VCA (%)	< VCADRC
RT (Mpa)	0,6
RRT (%)	70 mín
Estabilidade (Kgf)	632 mín
Escorrimento (%)	0,30 máx

Fonte: AASHTO MP8-01 (apud BLAZEJOWSKI, 2011)

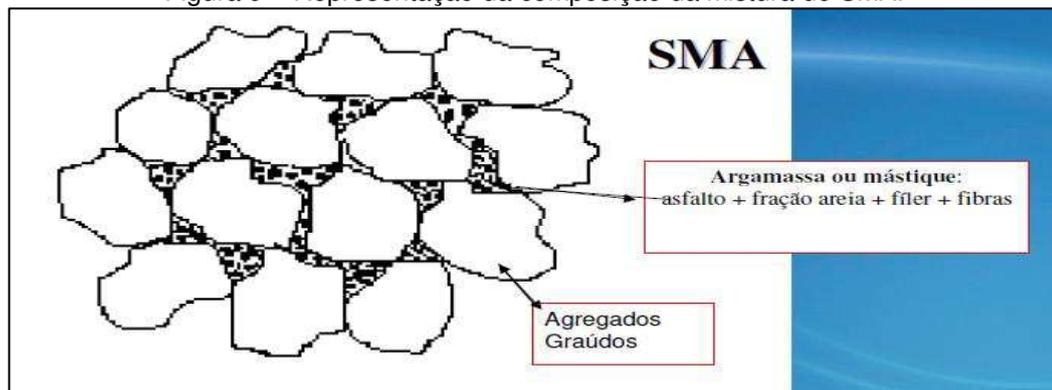
Apesar de as vantagens do SMA serem diversas conforme já citado neste item, Blazejowski (2011) aponta algumas desvantagens. Dentre estas, cita-se: devido ao alto teor de ligante utilizado, pode haver exsudação por conta de falhas e

variações do projeto, produção e lançamento da mistura; baixa resistência à derrapagem inicial – possibilidade de aparecimento de uma fina espessura de ligante sobre os agregados na superfície, o que pode ser evitado lançando um material granular sobre o pavimento durante a compactação do rolo; custos iniciais elevados se comparados a misturas asfálticas convencionais, uma vez que há um teor de ligante, fíler e fibra maiores, o que é compensado a longo prazo por uma vida útil maior do revestimento.

#### 2.4.3.3 Agregados graúdos

Como dito anteriormente, o SMA possui uma curva granulométrica descontínua. A seleção dos agregados graúdos para esta mistura se faz fundamental, visto que entre 70% a 80% da mistura em peso é composta por este agregado, exigindo um maior contato pedra-pedra (Figura 9). Na Europa, recomenda-se o uso de agregados 100% britados, devendo ser de alta qualidade com uma boa microtextura e sempre virgens, não podendo ser provenientes de revestimento reciclados (NEVES FILHO, 2004).

Figura 9 – Representação da composição da mistura do SMA.



Fonte: DER Paraná (2008)

As especificações para o agregado graúdo segundo a AASHTO MP8-01 são conforme a Tabela 2 a seguir:

Tabela 2 – Especificações do agregado graúdo para o SMA segundo a AASHTO MP8-01.

Ensaio	Método	Especificação
Abrasão Los Angeles	AASHTO T 96	30% Máx
Partículas achatadas e alongadas	ASTM D 4791	
3:1		20% Máx

	5:1		5% Máx
Absorção		AASHTO T 85	2% Máx
Sanidade (5ciclos)		AASHTO T 104	
	Sulfato de sódio		15% Máx
	Sulfato de magnésio		20% Máx
Agregados britados		ASTM D 5821	
	Uma face		100% Mín
	Duas faces		90% Mín

Fonte: NAPA (2002)

A especificação alemã organizou suas faixas granulométricas de modo que os últimos algarismos representam o diâmetro máximo nominal do agregado (Tabela 3). Portanto, as faixas foram separadas em quatro tipos: 0/11 S, 0/8 S, 0/8 e 0/5. Do mesmo modo a especificação norte-americana está organizada de acordo com diâmetro nominal máximo dos agregados, podendo ser: 25 mm, 19 mm, 12,5 mm, 9,5 mm e 4,75 mm, conforme a Tabela 4 (NEVES FILHO, 2004).

Tabela 3 - Faixas granulométricas alemã para o SMA.

Diâmetro de abertura (mm)	Porcentagem passando em peso			
	0/11 S	0/8 S	0/8	0/5
11,2	90 - 100	100	100	-
8,0	30 - 60	90 - 100	100 - 90	100
5,0	30 - 40	30 - 45	30 - 55	90 - 100
2,0	20 - 25	20 - 25	20 - 30	30 - 40
0,09	9 - 13	10 - 13	8 - 13	8 - 13

Fonte: EAPA (1998)

Tabela 4 – Faixas granulométricas norte-americana para o SMA conforme a AASHTO MP8-01.

Diâmetro de abertura (mm)	Porcentagem passando em volume									
	25 mm		19 mm		12,5 mm		9,5 mm		4,75 mm	
	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx
<b>37,50</b>	100	100	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>25,00</b>	90	100	100	100	-	-	-	-	-	-
<b>19,00</b>	30	86	90	100	100	100	-	-	-	-
<b>12,50</b>	26	63	50	74	90	100	100	100	-	-
<b>9,50</b>	24	52	25	60	26	78	90	100	100	100
<b>4,75</b>	20	28	20	28	20	28	26	60	90	100
<b>2,36</b>	16	24	16	24	16	24	20	28	28	65
<b>1,18</b>	13	21	13	21	13	21	13	21	22	36

<b>0,60</b>	12	18	12	18	12	18	12	18	18	28
<b>0,30</b>	12	15	12	15	12	15	12	15	15	22
<b>0,075</b>	8	10	8	10	8	10	8	10	12	15

Fonte: NAPA (2002)

#### 2.4.3.4 Mástique asfáltico

Granulometricamente, o SMA apresenta uma elevada porcentagem de agregados graúdos, uma ausência de agregados de tamanho intermediários, e uma determinada porcentagem de material fino. Assim, o grande volume de vazios existente passa a ser preenchido pelo mástique asfáltico – o qual é formado por esse material fino, juntamente do ligante asfáltico e as fibras. Portanto, a principal finalidade do mástique, além de preencher os vazios, é unir os agregados graúdos e fazer com que a mistura permaneça aglutinada e homogênea (MYERS, 2007).

##### 2.4.3.4.1 Agregado miúdo

Conforme Reis (2002), o agregado miúdo, praticamente não deve possuir em sua composição finos plásticos (argila) e materiais reativos, apresentando equivalente de areia mínimo de 55%.

A NAPA (2002) apresenta algumas especificações para o agregado miúdo, conforme a Tabela 5. Dentre estas destaca-se a angularidade do agregado fino, que para Gouveia (2002), é uma das propriedades mais importantes dos agregados de graduação fina. Segundo a autora, muitos pesquisadores têm afirmado que as características desse agregado têm influência predominante na resistência a deformação permanente das misturas asfálticas, principalmente para misturas bem graduadas e densas, visto que as características dos agregados finos são fundamentais no que se refere a estabilidade dessas misturas.

Tabela 5 – Especificações do agregado miúdo para o SMA segundo a AASHTO MP8-01.

<b>Ensaio</b>	<b>Método</b>	<b>Especificação</b>
Sanidade (5ciclos)	AASHTO T 104	
Sulfato de sódio		15% Máx
Sulfato de magnésio		20% Máx
Angularidade	AASHTO TP 33 (Método A)	45% Mín
Limite líquido	AASHTO T 89	25% Máx

#### 2.4.3.4.2 *Material de enchimento – Fíler*

O material de enchimento ou fíler a ser utilizado na mistura deve ser homogêneo, ativo - contribuindo para a melhoria da adesividade da mistura, não plástico, deve passar no mínimo 65% na peneira N° 200 (0,075 mm), seco e livre de grumos provenientes de agregações de partículas finas. Assim, os materiais de enchimento podem ser o pó calcário, cal hidratada CH-I ou cimento Portland (REIS, 2002).

Para Myers (2007), o tipo de material de enchimento também pode afetar no escorrimento do ligante. Isso acontece porque partículas menores proporcionam uma área de superfície maior para um dado peso e, portanto, tendem a endurecer o ligante mais do que as partículas grosseiras, mostrando assim, a importância clara do tamanho das partículas passando na peneira de N° 200.

Quanto a porcentagem de fíler utilizado na mistura do SMA, segundo Brown et al. (1997 apud MYERS, 2007), geralmente é utilizado um teor variando entre 8% a 11%, esse material fino com sua grande área de superfície, combinado ao ligante forma o mástique que unem os agregados graúdos. Para Neves Filho (2004), o teor de material passando na peneira N° 200 situa-se entre 8% a 13%, sendo um pouco superior ao de um concreto asfáltico convencional.

#### 2.4.3.4.3 *Ligante asfáltico*

Quanto ao ligante asfáltico, não há restrições em relação ao tipo de ligante que pode ser utilizado. Portanto, podem ser empregados asfaltos convencionais, bem como os modificados por polímero e ainda os asfalto-borracha.

De acordo com a NAPA (2002), o teor de ligante asfáltico para misturas do tipo SMA dever ser no mínimo 6%. Neves Filho (2002) afirma que as misturas SMA possuem uma película de ligante asfáltico mais espessa, com teor entre 1% a 1,5% superior ao de concreto asfálticos convencionais, e tem como objetivo evitar um desgaste dos agregados causado pelo contato pedra-pedra. Por isso há a necessidade de se utilizar aditivos, sejam eles asfaltos modificados ou fibras.

Alguns países da Europa preferem o uso de asfalto modificado por polímero nas misturas SMA, alguns até obrigam o uso destes, como a Itália e Portugal (EAPA, 1998 apud NEVES FILHO, 2004).

Segundo Mourão (2003), o uso dos cimentos asfálticos modificados por polímero é interessante por apresentar algumas vantagens, como a melhoria da coesão e da adesividade, redução da deformação permanente, aumento da vida de fadiga, reduzem a necessidade de inibidores de escorrimento, além de garantir melhor preservação da macrotextura ao longo da vida de serviço.

Quanto ao uso do asfalto-borracha no SMA, fora as vantagens ambientais e estruturais já comentadas no item 2.4.2.1, de acordo com Pazinato (2014), o asfalto-borracha ainda reduz consideravelmente o escorrimento do ligante.

#### *2.4.3.4.4 Fibras*

As fibras são agentes estabilizadores considerados a melhor opção para combater o escorrimento do ligante, uma vez que desempenham bem essa função e apresentam um baixo custo quando comparados a outros aditivos, como os polímeros. Além disso, permitem a mistura a elevadas temperaturas, aumentam o tempo para compactação e reduzem a segregação da mistura (MYERS, 2007).

Segundo Mourão (2003), as fibras podem ser provenientes de celulose (orgânica), de vidro (inorgânica) ou de material mineral. A principal função destas é evitar a segregação da mistura durante seu transporte, facilitar a aplicação e evitar o escorrimento do ligante asfáltico. Elas ainda fazem com que o ligante betuminoso fique mais consistente a altas temperaturas, o que diminui a formação dos afundamentos de trilha de roda, visto que o ligante é utilizado em porcentagens elevadas.

Para Beligni et al. (2000 apud MOURÃO, 2003), as fibras desempenham uma função de microarmadura (reticulado tridimensional) que em conjunto com os polímeros presentes no ligante betuminoso (quando utilizado) aumentam a coesão do sistema. Assim, as fibras permitem que sejam executadas misturas com alto teor de ligante sem riscos de exsudação ou perda da estabilidade mecânica, possibilitando ainda a utilização de uma granulometria descontínua com macrotextura do revestimento (Figura 10).

Figura 10 – Escorrimento do ligante em um SMA sem fibras.



Fonte: DER Paraná (2008)

A principal diferença entre as fibras está no seu poder de absorção, sendo que as fibras de celulose apresentam a maior eficiência de absorção de ligante betuminoso. Além disso, elas também possuem diferentes densidades e, portanto, diferentes volumes quando utilizadas nas misturas SMA. Fibras minerais necessitam de teores maiores se comparados as demais, geralmente em torno de 0,4% a 0,6%. Quando o agente estabilizador é utilizado na faixa recomendada e não consegue combater o escorrimento satisfatoriamente, deve-se aumentar a sua quantidade, o que irá melhorar o escorrimento. Porém, deve-se ressaltar que o aumento na porcentagem do estabilizador pode diminuir a trabalhabilidade da mistura (BLAZEJOWSKI, 2011).

As fibras podem ser adicionadas a granel diretamente no silo quente ou em forma granular de “pellets” (ou péletes). Esta última maneira é utilizada com o objetivo de evitar os grumos ou uma homogeneização inadequada, consistindo em 50% de fibra de celulose com 50% de ligante asfáltico que devem ser considerados na dosagem quando a mistura receber essas fibras, devendo-se ter o cuidado para que os péletes se dissolvam completamente na mistura (BROWN, 1992 apud MOURÃO, 2003).

Pank (1995) defende algumas recomendações para os diferentes tipos de fibras que podem ser utilizadas em misturas do tipo SMA, conforme a seguinte Tabela 6:

Tabela 6 – Recomendações finlandesas para adição de fibras em misturas asfálticas tipo SMA em relação ao peso total da mistura ligante – agregado.

<b>Tipo de fibra</b>	<b>Faixa recomendada de fibra na mistura (%)</b>
Fibra de celulose	0,3 - 0,5

Fibra mineral	0,7 - 0,9
Fibra de vidro	0,4 - 0,6

Fonte: PANK (1995)

A NCAT (1999 apud REIS, 2002) ainda apresenta algumas características exigidas para as fibras orgânicas (celulose), conforme a Tabela 7 a seguir:

Tabela 7 – Características exigidas para as fibras orgânicas (celulose).

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

Fonte: NCAT (1999 apud REIS, 2002)

#### 2.4.3.4.5 Fibra de sisal

De acordo com Martin et al. (2009), o sisal é a principal fibra dura produzida no mundo e, corresponde a cerca de 70% da produção comercial de todas as fibras desse tipo. No Brasil, os maiores cultivadores estão presentes na região Nordeste, sendo eles os estados da Bahia, Paraíba e Rio Grande do Norte, responsáveis por, respectivamente, 93,5%, 3,5% e 3% da produção nacional. A cultura do sisal se concentra em áreas de pequenos produtores, com predomínio do trabalho familiar, o que além de garantir renda e emprego, é um importante agente de fixação do homem à região semiárida do Nordeste. Mundialmente, o maior produtor e exportador de fibras de sisal e do sisal manufaturado é o Brasil, sendo 70% da produção nacional destinada aos mercados europeus e asiático.

A fibra de sisal tem como origem a planta de sisal, classificada como *Agave Sisalana Perrine*. Segundo Mattoso et al. (1997 apud LEOCÁDIO, 2005) as primeiras plantações de sisal (Figura 11) foram desenvolvidas pelos Maias, no México, antes da chegada dos europeus. No Brasil, a cultura sisaleira começou a

ser difundida a partir de 1920, no estado da Paraíba. As fibras de sisal classificam-se no grupo das fibras chamadas “estruturais”, cuja função é dar sustentação e rigidez às folhas. Elas são extraídas das folhas por um processo que utiliza uma desfibradeira, de maneira que cada folha de sisal contém em média 4% em peso de fibras. Do restante, 81% é líquido (suco) e os outros 15% são resíduos da desfibragem - sendo utilizados como adubo orgânico e ração animal.

Figura 11 – Plantação de sisal.



Fonte: EMBRAPA-CNPA (1997 apud LEOCÁDIO, 2005)

Conforme a SEAGRI (2002 apud CARVALHO, 2005), o sisal é amplamente difundido nas indústrias de cordoarias para produção de fios e cordas, cordéis, tapetes, capachos, artesanatos, e ainda como matéria prima para a fabricação de celulose e papéis renováveis. Na construção civil, sua maior aplicação é na composição de massas para a fabricação e fixação de forros de gesso, podendo ser utilizadas ainda no polimento de revestimentos cerâmicos, ou em substituição ao amianto e em mantas asfálticas.

Além dessas aplicações, há alguns estudos da utilização da fibra de sisal em materiais compósitos poliméricos. Os compósitos reforçados com fibras de sisal se destacam por apresentarem alta resistência ao impacto, e boas propriedades de resistência a tração e flexão. Isto é atribuído ao fato da fibra de sisal apresentar um dos maiores valores de módulo de elasticidade e de resistência mecânica entre as fibras naturais (MARTIN et al., 2009).



### **3 METODOLOGIA**

O desenvolvimento deste trabalho consistiu em, inicialmente, realizar uma vasta pesquisa bibliográfica a fim de se munir de todo conhecimento teórico para o bom prosseguimento da pesquisa em questão.

Após de realizados os estudos bibliográficos, foi dado início a fase dos ensaios no Laboratório de Solos e Pavimentação da UEMA (LSP). De início, foram estudados os agregados graúdos e miúdos, a fibra e os ligantes que compuseram a mistura, com vistas a conhecer suas propriedades físicas e mecânicas. Após essa etapa, foi realizada a dosagem da mistura propriamente dita e moldados os corpos de prova. Por fim, foi feita a análise dos resultados dos materiais ensaiados, bem como da mistura asfáltica, tendo como base as normas que tratam desse tipo de revestimento. Assim, foi possível avaliar a mistura e, mais precisamente, concluir acerca da viabilidade de uso da fibra de sisal nesse tipo de revestimento.

#### **3.1 Pesquisa bibliográfica**

Para a realização da pesquisa em questão foram realizados diversos estudos bibliográficos por meio de livros, artigos científicos, monografias, dissertações de mestrado, normas do DNIT e da AASHTO e demais trabalhos que somaram aos conceitos envolvidos neste.

Desta maneira, percorreu-se por uma revisão bibliográfica acerca de toda a pavimentação, desde os conceitos gerais sobre a infraestrutura de transporte rodoviária, aos conceitos mais precisos que tratam do pavimento, dos diferentes tipos de revestimento asfáltico, das propriedades dos materiais presentes numa mistura asfáltica, aos ensaios laboratoriais e interpretação de resultados.

Contudo, é de fundamental relevância citar que apesar de todos os estudos e pesquisas desenvolvidos, este trabalho tem como foco a análise da viabilidade de misturas asfálticas tipo SMA com uso de uma fibra alternativa, o sisal.

### 3.2 Fibra de sisal

A fibra de sisal utilizada foi doada pela empreiteira de serviços com gesso “Branco Gesso”. Esta fibra é amplamente utilizada na composição de massas para a fabricação e fixação de forros de gesso, além de ser amplamente difundida na produção de cordoarias e sacarias. Conforme Leocádio (2005), as vantagens do sisal dizem respeito a se tratar de uma fibra leve, atóxica, de alto módulo e resistência específica, apresenta facilidade de modificação superficial, facilidade de cultivo, abundante no Brasil e além de ser uma fonte renovável. Diante disso, despertou-se o interesse de conhecer o comportamento desta fibra na mistura asfáltica em questão, o SMA.

As fibras foram recebidas conforme a Figura 12, necessitando então, de um tratamento para sua incorporação.

Figura 12 – Fibra de sisal antes do tratamento.



Fonte: Autor (2017)

Inicialmente tentou-se triturar a fibra manualmente por meio de tesouras, fazendo com que toda a fibra passasse na peneira de 4,75 mm, assegurando o tamanho máximo exigido conforme mostrado na Tabela 7. Contudo, percebeu-se que era totalmente inviável prosseguir manualmente, visto que levava um tempo dispendioso e não havia homogeneidade no tamanho da fibra. Ainda foram realizados ensaios de escorrimento para este tratamento, considerando 6% de teor de ligante e teores de fibra variando entre 0,5%, 1,0% e 1,5%. Contudo, os

resultados foram muito além do máximo exigido de 0,3%, ficando evidenciado que houve uma grande exsudação do ligante, como exibido na Figura 13.

Figura 13 – Escorrimento para a fibra triturada manualmente.



Fonte: Autor (2017)

Portanto, foi necessário utilizar um triturador mecânico que pudesse picotar uma grande quantidade de fibra e que a deixasse mais homogênea. Assim, foi utilizado o triturador tipo “Trapp TRF-60” (Figura14). O triturador pertence ao Instituto Federal do Maranhão – IFMA, campus Monte Castelo (São Luís), e foi cedido pelo Departamento de Mecânica dos Materiais – DMM.

Figura 14 – Trituramento mecânico da fibra.



a) Triturador Trapp TRF-60      b) Fibra sendo triturada  
Fonte: Autor (2017)

Este triturador permite ajustar o tamanho desejado do corte do material. Assim, optou-se por utilizar o tamanho de 2 mm, já que os resultados para a tentativa de corte manual das fibras passando na peneira de 4,75 mm foram insatisfatórios. Após de trituradas as fibras, o material foi passado na peneira de 2 mm (N° 10), a fim de que fosse assegurada a homogeneidade das fibras (Figura 15), pois devido a ela ter um diâmetro médio pequeno, durante o trituração, poderia ter passado algum material maior do que 2 mm.

Figura 15 – Fibra de sisal após o trituração mecânico.



Fonte: Autor (2017)

Depois de definido o tratamento para a utilização da fibra, foram estudados alguns parâmetros, como: comprimento médio, diâmetro médio e densidade (Tabela 8). A densidade foi obtida pelo método do picnômetro, conforme será descrito no item 3.3.1.11. Além disso, foi realizado o ensaio de escorrimento para este tratamento, obtendo-se melhores resultados se comparados às fibras que foram trituradas manualmente, e será discutido no item 3.3.3.1.

Tabela 8 – Características da fibra de sisal utilizada no estudo.

<b>Parâmetro</b>	<b>Valor</b>
Comprimento médio (mm)	0,80
Diâmetro médio (mm)	0,24
Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	1,670

Fonte: Autor (2017)

### 3.3 Ensaio laboratoriais

Os ensaios laboratoriais se desenvolveram na própria Universidade Estadual do Maranhão – UEMA (Campus Paulo VI), no Laboratório de Solos e Pavimentação (LSP), que se situa no Centro de Ciências Tecnológicas – CCT.

Todos os materiais utilizados no presente estudo foram viabilizados por meio de doação ou já se encontravam no estoque do laboratório. Assim sendo:

1. Agregados graúdos e miúdos: fornecidos por empresas do ramo rodoviário sediadas em São Luís. Os materiais britados, segundo informações, são provenientes da mineradora Granorte S/A, situada em Bacabeira - MA;
2. Material de enchimento (cimento Portland): material do estoque do laboratório de solos e pavimentação – LSP.
3. Fibra de sisal: cedida pela empreiteira de serviços com gesso “Branco gesso”.
4. CAP 50/70: material do estoque do laboratório de solos e pavimentação – LSP, proveniente da Lubnor de Fortaleza - CE.
5. Asfalto-borracha (ECOFLEX B): cedida pela empresa GRECA Asfaltos.

#### 3.3.1 Ensaio nos agregados minerais

Dos agregados minerais estudados em laboratório, os agregados graúdos foram a brita 1 e brita 0, os miúdos foram: pó de brita e a areia. Para material de enchimento foi utilizado o cimento Portland.

A necessidade dos ensaios nos agregados minerais se faz no intuito de além de conhecer suas características, avaliar, conforme as especificações para cada material, se eles podem ou não ser utilizados na mistura asfáltica estudada.

##### 3.3.1.1 *Granulometria dos agregados*

A distribuição granulométrica dos agregados é uma de suas principais características e efetivamente influi no comportamento dos revestimentos asfálticos. Em misturas asfálticas a distribuição granulométrica do agregado influencia quase todos as propriedades importantes incluindo rigidez, estabilidade, durabilidade,

permeabilidade, resistência à fadiga e à deformação permanente, resistência ao dano por umidade induzida etc (BERNUCCI et al., 2006).

O ensaio de granulometria consiste em fracionar uma amostra seca por peneiramento após reduzi-la por meio de um separador mecânico, conforme instruído na DNER-PRO 199/96.

Para o procedimento deste ensaio é seguida a norma rodoviária DNER-ME 083/98 e, realiza-se fracionando os agregados nas peneiras de um conjunto organizadas em ordem decrescente de abertura das malhas, tomando-se nota dos pesos retidos em cada peneira, conforme a Figura 16. Com os pesos retidos, obtém-se os pesos acumulados. A partir da massa inicial da amostra ensaiada, é possível então calcular as porcentagens retidas e passantes em cada peneira e, por fim, fazer a curva granulométrica.

Figura 16 – Sequência de peneiras para o ensaio de granulometria.



Fonte: Autor (2017)

### 3.3.1.2 Resistência à abrasão “Los Angeles”

De acordo com Bernucci et al. (2006, p.133), nos revestimentos asfálticos, tanto durante o manuseio e execução quanto durante a ação do tráfego, os agregados estão sujeitos a quebras por abrasão. Deste modo, estes devem apresentar habilidade para resistir a quebras, degradação e desintegração. Assim, o

ensaio de resistência à abrasão avalia como o agregado se comporta mediante a cargas abrasivas.

O ensaio segue o método da norma DNER-ME 035/98. De início, o material a ser ensaiado é lavado e seco em estufa a uma temperatura entre 105°C e 110°C. Em seguida, procede-se ao quarteamento em diferentes porções retiradas nas diferentes peneiras a fim de fornecer a amostra da graduação escolhida (n). Após de determinadas as massas de acordo com a graduação adotada, obtém-se a massa total da amostra seca ( $M_n$ ) que é levada, juntamente da carga abrasiva (esferas de aço), à máquina Los Angeles, como mostra a Figura 17. Submete-se o tambor do equipamento a um determinado número de rotações conforme a graduação escolhida. Após as revoluções, retira-se o material do equipamento e faz-se passar na peneira 1,7 mm desprezando o que for passante. Por fim, lava-se o agregado na própria peneira, seca-o em estufa à temperatura entre 105°C e 110°C durante, no mínimo, 3 horas e, determina-se a massa da amostra lavada e seca ( $M'n$ ).

Figura 17 – Ensaio de resistência à abrasão Los Angeles.



a) Amostra de ensaio conforme graduação

b) Máquina Los Angeles

Fonte: Autor (2017)

Assim, a abrasão é calculada pela Equação 1:

$$A_n = \frac{M_n - M'n}{M_i} \times 100 \quad (1)$$

Em que:

$A_n$  – abrasão “Los Angeles” da graduação n, dada em %;

n – graduação (A, B, C, D, E, F ou G) adotada para o ensaio;

$M_n$  – massa total a amostra seca colocada na máquina, dada em g;

$M'_n$  – massa total da amostra lavada e seca, após o ensaio (retida na peneira de 1,7 mm), dada em g.

### 3.3.1.3 Absorção

O ensaio de absorção indica o quanto poroso o agregado é, ou seja, o quanto ele absorve de água quando imerso. Assim, quanto mais poroso for o agregado, mais ele absorverá ligante, sendo então necessário compensar esse fato incorporando uma quantidade adicional de ligante (BERNUCCI et al., 2006, p.142).

Para a realização do ensaio é seguida a norma DNER-ME 081/98, de maneira que a absorção é calculada entre a relação percentual da variação das massas saturada e seca, dividida pela massa seca. Para tanto, a quantidade de amostra a ser ensaiada é separada conforme a dimensão máxima característica do agregado, sendo lavada sobre a peneira 4,8 mm e seca até a massa constante à temperatura entre 105°C e 110°C. Depois resfria-se a amostra ao ar à temperatura ambiente entre 1 h a 3 h. Em seguida, o material é imerso em água por um período em torno de 24 h. Após esse período, o agregado é espalhado sobre um pano absorvente até que qualquer película de água sobre a superfície do material deixe de ser visível (Figura 18) , sendo, subseqüentemente, determinada a massa na condição saturada superfície seca ( $M_h$ ). Por fim, a amostra é seca em estufa à temperatura entre 105°C e 110°C e resfriada ao ar entre 1h a 3h, sendo determinada a massa do agregado seco ( $M_s$ ).

Figura 18 – Execução do ensaio de absorção.



Fonte: Autor (2017)

Para o cálculo da absorção utiliza-se a Equação 2:

$$a = \frac{Mh - Ms}{Ms} \times 100 \quad (2)$$

Em que:

a – Absorção do agregado, em %;

Ms – Massa do agregado seco em estufa, ao ar, determinado em g;

Mh – Massa do agregado na condição saturada seca, ao ar, determinado em g.

### 3.3.1.4 Adesividade

O ensaio de adesividade mostra se o agregado, em presença de água, separa ou descola a película de ligante asfáltico, uma vez que caso isso ocorra, o agregado torna-se inutilizável em misturas asfáltica, sendo este agregado denominado hidrófilo. Enquanto que agregados com alta adesividade em presença de água são denominados hidrofóbicos e, são ideais para ser utilizados em misturas asfálticas (BERNUCCI et al., 2006, p.143).

O método de execução para este ensaio é o DNER-ME 078/94. O ensaio consiste em separar uma amostra de 500 g que passa na peneira de 19 mm e fica retida na peneira de 12,7 mm, em seguida é lavada e colocada dentro d'água destilada durante 1 min. Após isso, leva-se o material para estufa a 120°C, nela permanecendo durante 2 h. Como para este caso o ligante betuminoso utilizado foi o cimento asfáltico, o CAP e a amostra previamente preparada são aquecidos a 120°C e 100°C, respectivamente e, subsequentemente, são misturados de maneira que o agregado seja envolvido completamente pelo ligante. Para finalizar o ensaio, deixa-se esfriar a mistura em uma superfície lisa, que depois é colocada em um frasco de vidro coberta por água destilada durante 72 h (Figura 19).

Figura 19 – Amostras após mistura antes da imersão em água destilada.



Fonte: Autor (2017)

### 3.3.1.5 Índice de forma

Conforme Bernucci et al. (2006, p.141), no que tange a forma das partículas, os agregados que possuem a forma mais irregular ou angular tendem a apresentar melhor intertravamento entre os grãos compactados. Desta maneira, quanto mais cúbicas forem as partículas e mais afiladas forem suas arestas, melhor é a trabalhabilidade e a resistência das misturas asfálticas.

O ensaio é realizado seguindo a NBR 6954/1989 e consiste em separar uma quantidade de amostra e determinar as medidas de comprimento (a), largura (b) e espessura (c) de cada agregado (Figura 20). Após isso, são calculadas as razões  $b/a$  e  $c/b$ . De acordo com os resultados dessas razões, o agregado pode ser classificado quanto à forma em: cúbica, alongada, lamelar e alongada-lamelar, como mostrado na Tabela 9:

Tabela 9 - Classificação da forma das partículas (ABNT NBR 6954/1989).

<b>Média das Relações <math>b/a</math> e <math>c/b</math></b>	<b>Classificação quanto à forma</b>
$b/a > 0,5$ e $c/b > 0,5$	Cúbica
$b/a < 0,5$ e $c/b > 0,5$	Alongada
$b/a > 0,5$ e $c/b < 0,5$	Lamelar
$b/a < 0,5$ e $c/b < 0,5$	Alongada-lamelar

Fonte: Bernucci et al. (2006)

Figura 20 – Determinação das dimensões do agregado.



Fonte: Autor (2017)

### 3.3.1.6 Angularidade do agregado fino (FAA)

O ensaio de angularidade do agregado fino – FAA (Fine Aggregate Angularity), analisa o quão anguloso e rugoso é a partícula do agregado miúdo. Assim, a adoção deste ensaio baseia-se na hipótese de que agregados finos com altos valores de FAA apresentam um maior intertravamento das partículas, o que promove maior resistência ao cisalhamento e, conseqüentemente, maior estabilidade da mistura (GOUVEIA, 2002).

A norma que rege este ensaio é ASTM C 1252 – 03 e possui três possíveis métodos de execução de ensaio, sendo adotado o método A. De início, prepara-se a amostra de ensaio fracionando-se cada peso recomendado que passa e fica retido nas determinadas peneiras, como mostra a Tabela 10. Após de obtida as frações, é feita a mistura destas até que se tornem homogêneas.

Tabela 10 - Frações do agregado fino para preparo da amostra de ensaio.

Fração de tamanho individual		Massa (g)
# Passando	# Retido	
Nº 8	- Nº 16	44
Nº 16	- Nº 30	57
Nº 30	- Nº 50	72
Nº 50	- Nº 100	17
<b>Total</b>		<b>190</b>

Fonte: ASTM C 1252 (2003)

Depois de preparada a amostra, é necessário conhecer o volume (V) e o peso (c) exatos do cilindro. Para a determinação precisa do volume, tara-se a balança com o cilindro e a placa de vidro em cima, em seguida enche-o com água destilada e rasa-se com a placa de vidro (devendo ser enxugada a parte exterior do cilindro), por fim, o conjunto é pesado novamente e então é determinado o volume. Com o equipamento próprio para o ensaio de angularidade – o qual contém um funil onde é colocada a amostra e, em seguida, é vertida a um cilindro de volume conhecido (cerca de 100 cm<sup>3</sup>), prossegue-se o ensaio rasando o excesso de material que ficou no cilindro, sendo necessário dar algumas batidas no corpo deste para evitar que haja perda de material, sendo determinado o peso do agregado fino mais o peso do cilindro (W), conforme Figura 21.

Figura 21 – Ensaio de angularidade do agregado fino (FAA).



a) Preparação de amostras

b) Determinação do volume (V)



c) Conjunto do ensaio de angularidade

d) Determinação do peso (W)

Fonte: Autor (2017)

O valor do FAA (U) é calculado de acordo com a Equação 3:

$$U = \frac{V - \left(\frac{F}{D_r}\right)}{V} \times 100 \quad (3)$$

Onde F é determinado pela Equação 4:

$$F = W - c \quad (4)$$

Em que:

U – Angularidade do agregado fino (FAA), determinado em %;

V – Volume do cilindro, determinado em cm<sup>3</sup>;

D<sub>r</sub> – Densidade real do agregado miúdo, determinado em g/cm<sup>3</sup>;

F – Diferença entre a massa do agregado fino e a massa do cilindro;

W - Peso do agregado fino mais o peso do cilindro, determinado em g;

c – Peso do cilindro, determinado em g.

### 3.3.1.7 Equivalente de areia

O ensaio de equivalente de areia (Figura 22) diz respeito a pureza do agregado miúdo. Assim, ele determina a proporção relativa de materiais do tipo argila ou pó presentes na amostra ensaiada. A norma para este ensaio é a DNER–ME 054/97.

Figura 22 – Ensaio de equivalente de areia.



Fonte: Autor (2017)

Assim, ele consiste em utilizar uma amostra cujas partículas passam na peneira de 4,8 mm (Nº 4), que é colocada em um recipiente de medida padrão, com capacidade em torno de 85 ml. Em seguida sinfona-se na proveta uma solução de trabalho – que é composta por uma determinada quantidade de solução concentrada (cloreto de cálcio-glicerina-formaldeído) diluída em água destilada, até atingir o traço de referência a 10 cm da base. Após isso, é colocada na proveta a amostra, sendo necessário dar umas batidas a fim de expulsar o ar. Assim, o conjunto é deixado em repouso durante 10 min. Após esse tempo, tapa-se a proveta com uma rolha e agita-se o conjunto horizontalmente, executando 90 ciclos em 30 segundos. Depois retira-se a rolha e novamente sinfona-se a solução de trabalho lavando as paredes da proveta até atingir a marca do círculo de referência superior da proveta. Deixa-se então, novamente em repouso por mais 20 min. Após esse período é feita a primeira leitura (H1), que corresponde à altura da base até onde há a suspensão de argila. Por fim, introduz-se o pistão até assentar completamente na areia e,

subsequentemente, gira-se o pistão até que um dos parafusos de ajustagem se torne visível, sendo feita a segunda leitura (H2), que corresponde à altura do agregado sedimentado e, vai da base até o centro de um dos parafusos de ajustagem.

O equivalente de areia (EA) é calculado pela Equação 5:

$$EA = \left( \frac{H2}{H1} \right) \times 100 \quad (5)$$

Em que:

EA – Equivalente de areia, em %;

H1 – Leitura no topo da argila, em cm;

H2 – Leitura no topo da areia, em cm.

### 3.3.1.8 Massa específica dos agregados graúdos

Para a realização do ensaio de determinação da massa específica dos agregados graúdos foi utilizado o método do cesto, baseado no princípio de Arquimedes – o qual diz que o volume de água deslocado por um sólido irregular é exatamente igual ao volume do próprio sólido (Figura 23). Procedeu-se o ensaio conforme a norma DNER-ME 081/98.

Figura 23 – Determinação do volume deslocado (Vd).



Fonte: Autor (2017)

O ensaio consiste em separar uma amostra do agregado seco que preencha o cesto metálico padrão, assim é determinada a massa seca ( $M_s$ ). Subsequentemente, com um balde cheio de água, imerge-se completamente a cesta com o agregado e determina-se o volume deslocado ( $V_d$ ), como exibido na Figura 23.

A massa específica ( $\mu$ ) dos agregados graúdos é calculada pela Equação 6:

$$\mu = \frac{M_s}{V_d} \quad (6)$$

Em que:

$\mu$  – Massa específica do agregado graúdo, em  $\text{g/cm}^3$ ;

$M_s$  – Massa seca do agregado graúdo, determinado em g;

$V_d$  – Volume deslocado, determinado em  $\text{cm}^3$ .

### 3.3.1.9 Massa específica dos agregados miúdos por meio do frasco Chapman

A determinação da massa específica dos agregados miúdos por meio do frasco Chapman (Figura 24) segue os procedimentos da DNER-ME 194/98.

Figura 24 – Frasco Chapman com as amostras de ensaio.



a) Areia natural

b) Pó de brita

Fonte: Autor (2017)

Para a realização do ensaio, separa-se uma amostra seca em estufa (105°C a 110°C). Coloca-se água no frasco até atingir a marca de 200 cm<sup>3</sup> e, a posteriori, insere-se 500 g do agregado miúdo no frasco agitando-o a fim de que as bolhas de ar sejam eliminadas. Por fim, faz-se a leitura do nível de água atingido no gargalo do frasco (L), que indica o volume ocupado pelo conjunto água-agregado miúdo.

Assim, calcula-se a massa específica do agregado miúdo pela seguinte Equação 7:

$$\gamma = \left( \frac{500}{L - 200} \right) \quad (7)$$

Em que:

$\gamma$  – Massa específica do agregado miúdo, expressa em g/cm<sup>3</sup>;

L – Leitura no frasco referente ao volume ocupado pelo conjunto água-agregado miúdo, expressa em cm<sup>3</sup>.

### 3.3.1.10 Massa específica do material de enchimento pelo frasco Le Chatelier

Para a realização do ensaio de determinação da massa específica de materiais finamente pulverizados, obedece-se a norma DNER-ME 085/94 – a qual fixa os procedimentos, requisitos e cálculos para obtenção dessa. Para este estudo foi utilizado cimento Portland (Figura 25).

Figura 25 – Determinação da massa específica do cimento Portland pelo Frasco Le Chatelier.



a) Frasco Le Chatelier b) Execução do ensaio  
 Fonte: Autor (2017)

Para tanto, coloca-se no frasco Le Chatelier o querosene até que atinja a graduação entre 0 e 1 cm<sup>3</sup>, devendo-se enxugar as paredes do frasco, se necessário. É feita então a primeira leitura do nível superior do líquido (Li). Subsequentemente, coloca-se cerca de 60 g do material, tendo o cuidado com o líquido para que não ultrapasse a faixa superior da graduação do frasco e para que a amostra não adira às paredes, sendo feita a última leitura (Lf), que corresponde ao volume do conjunto líquido e amostra.

A massa específica do material de enchimento é calculada pela seguinte Equação 8:

$$\mu = \left( \frac{M}{Lf - Li} \right) \quad (8)$$

Em que:

$\mu$  – Massa específica do material de enchimento, em g/cm<sup>3</sup>;

M – Massa da amostra, determinado em g;

Li – Leitura inicial do querosene, determinado em cm<sup>3</sup>;

Lf – Leitura final do conjunto querosene e material de enchimento, determinado em cm<sup>3</sup>.

### 3.3.1.11 Densidade real pelo método do picnômetro

A determinação da densidade real pelo método do picnômetro foi utilizada para calcular a densidade da fibra de sisal utilizada e, dos agregados miúdos os quais tiveram a angularidade estudada (Figura 26). A norma utilizada para os dois casos foram as DNER-ME 093/94 e DNER-ME 084/95, respectivamente.

O ensaio consiste em separar uma determinada quantidade de amostra representativa que passa na peneira de 4,8 mm (Nº 4) e fica retida na peneira de 0,075 mm (Nº 200), devendo ser seca em estufa (entre 105°C e 110°C) até constância de massa. Pesa-se o picnômetro (a), o qual deve estar vazio, seco e devidamente limpo. Depois coloca-se a amostra no picnômetro e determina-se o peso (b), que se refere ao conjunto picnômetro e amostra. A seguir, é colocado água destilada no conjunto até que cubra com excesso o material, sem encher por completo o picnômetro. Aquece-se o picnômetro até a fervura por cerca de 15 min, a fim de que todo o ar seja expulso, tendo o cuidado de agitar sempre que necessário

para evitar o superaquecimento. Após aquecer, resfria-se o conjunto em banho d'água à 25°C e completa-se o volume do picnômetro com água destilada até atingir o traço de referência, enxugando a parte exterior. Deste modo, pesa-se o picnômetro com o conteúdo e determina-se o peso (c). Por fim, retira-se todo material picnômetro, que em seguida é lavado e completamente cheio de água até o traço de referência, sendo pesado e designado o peso (d).

Figura 26 – Determinação da densidade real pelo método do picnômetro.



a) Fibra de sisal

b) Pó de brita

Fonte: Autor (2017)

Para o cálculo da densidade real pelo método do picnômetro ( $D_r$ ), utiliza-se a Equação 9 a seguir:

$$D_r = \frac{b - a}{(d - a) - (c - b)} \quad (9)$$

Em que:

$D_r$  – Densidade real, em g/cm<sup>3</sup>;

a – Peso do picnômetro vazio e seco, determinado em g;

b – Peso do picnômetro mais amostra, determinado em g;

c – Peso do picnômetro mais amostra, mais água, determinado em g;

d – Peso do picnômetro completamente cheio d'água, determinado em g.

### 3.3.2 Ensaios no ligante asfáltico

Para o desenvolvimento desta pesquisa foram utilizados como ligantes asfálticos o CAP 50/70 e o ECOFLEX B (asfalto-borracha). Assim, se faz necessário realizar alguns ensaios os quais ratificam a qualidade do material e identificam suas

propriedades. As especificações para o CAP estão na norma DNIT 095/2006, a qual fixa características exigíveis para os cimentos asfálticos de petróleo isentos de aditivos utilizados na pavimentação.

Deste modo, apenas o CAP 50/70 foi ensaiado no LSP, visto que o ECOFLEX B, conforme Elias (2016), foi ensaiado pelo fabricante e suas propriedades determinadas pela viscosidade estão presentes na Tabela 11.

Tabela 11 – Temperaturas de mistura e compactação para o ECOFLEX B.

<b>Descrição</b>	<b>Temperatura (°C)</b>
Ligante	175
Agregado	183
Compactação	175

Fonte: GRECA ASFALTOS (2015 apud ELIAS, 2016)

### 3.3.2.1 Ensaio de penetração

O ensaio de penetração procedeu-se conforme a norma DNIT-ME 155/2010 e, de acordo com Bernucci et al. (2006), “A penetração é a profundidade, em décimos de milímetro, que uma agulha de massa padronizada (100g) penetra numa amostra de volume padronizado de cimento asfáltico, por 5 segundos, à temperatura de 25°C”. Está representado conforme a Figura 27.

Figura 27 – Execução do ensaio de penetração.



Fonte: Autor (2017)

Para tanto, a amostra de CAP coletada é colocada no recipiente de penetração e mantido a temperatura de 25°C em banho d'água. Subsequentemente, coloca-se o recipiente da amostra dentro da cuba de transferência, enche-se de água de maneira que a amostra fique completamente submersa. Ajusta-se o conjunto sobre o prato do penetrômetro de maneira a deixar a agulha na superfície da amostra, tendo-se o cuidado para que esta não exerça pressão sobre o material. Assim, anota-se a primeira leitura ( $L_i$ ). Por fim, libera-se rapidamente a agulha durante 5 segundos e em seguida anota-se a leitura final ( $L_f$ ). É necessário que se faça três determinações em pontos distintos na superfície da mesma amostra.

A penetração ( $P$ ) é calculada conforme a Equação 10:

$$P = (L_f - L_i) \quad (10)$$

Em que:

$P$  – Penetração da amostra de CAP, em décimos de milímetro;

$L_i$  – Leitura inicial do penetrômetro, em décimos de milímetro;

$L_f$  – Leitura final do penetrômetro, em décimos de milímetro.

### 3.3.2.2 *Ensaio de viscosidade Saybolt-Furol*

A viscosidade do ligante asfáltico diz respeito a uma medida de consistência por resistência ao cisalhamento. Assim, se faz importante uma vez que determina a consistência adequada para ser utilizado na mistura com os agregados, garantindo que estes sejam completamente cobertos e envoltos pelo ligante (BERNUCCI et al., 2006).

A norma que rege este ensaio é a NBR 14950/2003. O ensaio realiza-se por meio do equipamento Saybolt-Furol, o qual possui um tubo com formato e dimensões padronizadas e, no fundo, um orifício de diâmetro conhecido. Proceda-se ao ensaio colocando o material a ser ensaiado no tubo, deixando-se, inicialmente, o orifício vedado. Quando o ligante estabiliza na temperatura de ensaio escolhida, abre-se o orifício, de maneira que o ligante será vertido a um frasco padrão de 60 ml (Figura 28). Registra-se, então, o tempo que o ligante atingirá a marca indicativa dos 60 ml, sendo este tempo nomeado de segundos Saybolt-Furol (SSF). Frisa-se que as temperaturas escolhidas foram: 135°C, 150°C e 177°C. Com os resultados para estas temperaturas, traça-se um gráfico da viscosidade em função dos segundos

Saybolt-Furol e temperatura, a qual determinará as temperaturas do ligante e agregados na mistura, bem como a temperatura de compactação.

Figura 28 – Execução do ensaio de viscosidade Saybolt-Furol.



Fonte: Autor (2017)

### 3.3.2.3 Ensaio de ponto de amolecimento

O ensaio de ponto de amolecimento, ou anel e bola, diz respeito a uma medida empírica que correlaciona a temperatura a qual o asfalto amolece quando aquecido sob certas condições particulares e atinge uma determinada condição de escoamento (BERNUCCI et al., 2006, p.48).

O ensaio é descrito pela norma rodoviária DNIT-ME 131/2010 e, consiste em encher os anéis metálicos padronizados com uma amostra fluida do ligante, deixando-se resfriar em seguida, tendo o devido cuidado para que a superfície do centro da amostra esteja na mesma altura da borda do anel. Posteriormente ao resfriamento da amostra, monta-se o aparelho do ensaio e enche-se o béquer com água destilada. Posiciona-se os anéis horizontalmente no suporte do aparelho, coloca-se as guias das bolas sobre os anéis e, em seguida, insere-se o conjunto no béquer. Por fim, as bolas de aço são posicionadas nas guias sobre os anéis e o conjunto é aquecido. Por meio de um termômetro - que deve ficar suspenso no

suporte, registram-se as temperaturas nos instantes que cada material envolto pela bola de aço toca a placa inferior do aparelho, conforme mostra a Figura 29.

Figura 29 – Ensaio de ponto de amolecimento.



a) Conjunto no início do ensaio    b) Conjunto no fim do ensaio

Fonte: Autor (2017)

### 3.3.3 Ensaio na mistura asfáltica

Neste ponto será discutido acerca dos ensaios realizados na mistura asfáltica, descrevendo cada procedimento e os métodos utilizados, bem como a dosagem dos corpos de prova e os parâmetros avaliados.

#### 3.3.3.1 Ensaio de Escorrimento – método de Schellenberg

Como já comentado, as misturas asfálticas tipo SMA possuem um alto teor de ligante, o que torna necessário a utilização de algum aditivo estabilizador que combata a exsudação. Assim, este ensaio tem como objetivo avaliar se há escorrimento do ligante e, caso haja, verificar se está adequado ao limite estabelecido, neste caso, de 0,3% para o SMA conforme a Tabela 1.

O método de ensaio seguido foi o de Schellenberg, conforme a norma europeia 12697-18 (apud MIRANDA, 2013). Neste estudo, o agente estabilizador utilizado foi a fibra de sisal com o CAP 50/70 e com o asfalto-borracha.

O ensaio consiste em preparar 1000 g de mistura asfáltica conforme o traço definido, obedecendo as temperaturas de mistura e compactação encontradas. Subsequentemente, a mistura é colocada em um béquer previamente tarado – que deve ter 100 mm de diâmetro e capacidade mínima de 800 ml, sendo determinado o peso exato da mistura. Em seguida o béquer é levado à estufa na temperatura de compactação por 60 minutos ( $\pm 1$  minuto). Por fim, retira-se o conjunto da estufa e vira-se o béquer deixando a base para cima durante 10 segundos, determinando então, o peso do béquer com o ligante que ficou retido (Figura 30). Conhecido o peso do béquer, encontra-se o peso do ligante que ficou aderido nas paredes do recipiente. Assim, o escorrimento é calculado pela média aritmética de duas determinações da razão entre o peso do ligante retido no béquer e o peso da mistura.

Figura 30 – Ensaio de escorrimento.



a) Determinação do peso da mistura

b) Conjunto na estufa

c) Ligante retido no béquer

Fonte: Autor (2017)

Para o CAP 50/70 foram ensaiados teores de ligante de 6,0%, 6,5% e 7%. Quanto ao teor de fibra, por mais que a recomendação seja de 0,3% a 0,5%, verificou-se que para 0,5% de fibra e o menor teor de CAP (6%) ainda havia um grande escorrimento do ligante. Assim, para cada teor de ligante foram testados três teores diferentes de fibra, variando entre 0,5% a 2%.

Já o ECOFLEX B foi testado para o teor de 7% de ligante variando o teor de fibra entre 0,3% e 0,5%.

### 3.3.3.2 Dosagem Marshall

O método de dosagem de misturas asfálticas mais utilizado no Brasil é o Marshall, cujo procedimento de ensaio segue-se a norma DNER-ME 043/95. Em linhas gerais, com este método obtém-se parâmetros de dosagem como: densidade máxima teórica da mistura, densidade aparente dos corpos de prova, volume de vazios, vazios de agregado mineral e relação betume vazios. Além desses parâmetros, ainda é determinado a estabilidade Marshall, fluência e resistência à tração, permitindo assim, ao final, determinar o teor ótimo de ligante.

Para o início da dosagem, é necessário conhecer as temperaturas de mistura do ligante e agregado, bem como a temperatura de compactação, os quais são determinados pelo ensaio de viscosidade Saybolt-Furol (item 3.3.2.2) e estão representados na Tabela 12.

Tabela 12 – Temperaturas de mistura e compactação.

Descrição	Temperatura (°C)	
	CAP 50/70	ECOFLEX B
Ligante	165	175
Agregado	175	183
Compactação	150	175

Fonte: Autor (2017)

Para o CAP 50/70 e o ECOFLEX B foram definidos 3 teores de ligante distintos, sendo moldados para cada teor 6 corpos de prova (CP's). Destes, 3 CP's destinam-se a avaliação da estabilidade Marshall e fluência, e os outros 3 a resistência à tração.

Assim, foram moldados inicialmente um total de 36 CP's, 18 para o CAP 50/70 e 18 para o ECOFLEX B. O procedimento para moldagem dos corpos de prova foi conforme descrito a seguir e está representado nas Figuras de 31 a 34. É de fundamental relevância ressaltar que os 50 golpes definidos para a compactação dos corpos de prova foram seguidos conforme a recomendação da AASHTO PP-41 (apud NEVES FILHO, 2004), visto que se trata de um SMA.

- a) Secagem em estufa dos agregados entre 105°C a 110°C até a constância em massa;
- b) Pesagem de cada fração de agregado de acordo com o traço definido, de maneira que se obtenha cerca de 1200 g em peso considerando ligante e fibras (Figura 31);
- c) Aquecimento do ligante e dos agregados (Figura 32a) de acordo com a temperatura do ligante indicada na Tabela 12;
- d) Aquecimento do molde metálico de compactação (Figura 32b) a temperatura de 110°C;
- e) Mistura manual dos materiais (agregados, ligante e fibras) durante 2 a 3 minutos até que todos os agregados estejam completamente cobertos pelo ligante (Figura 33);
- f) Compactação mecânica da mistura (Figura 34a) com 50 golpes por face a temperatura de compactação definida (Tabela 12);
- g) Desmoldagem dos corpos de prova (Figura 34b);

Figura 31 – Pesagem e separação dos agregados para mistura.



Fonte: Autor (2017)

Figura 32 – Aquecimento dos materiais para mistura.



a) Ligante e agregados

b) Moldes de compactação

Fonte: Autor (2017)

Figura 33 – Mistura dos materiais.



Fonte: Autor (2017)

Figura 34 – Compactação e desmoldagem dos CP's.



a) Compactador automático

b) Equipamento para a desmoldagem

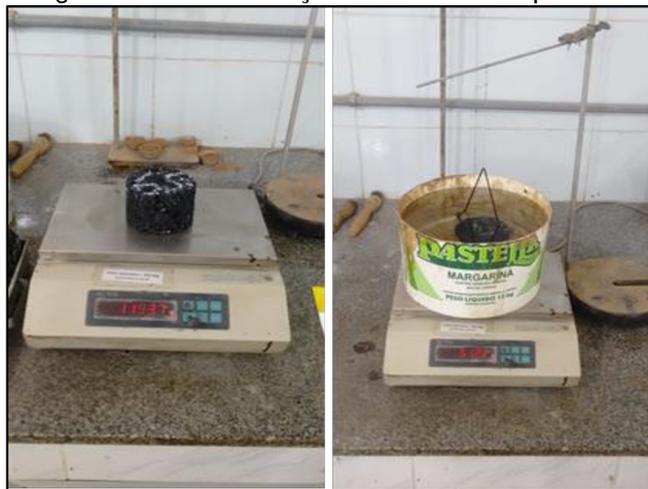
c) Desmoldagem

d) CP's

Fonte: Autor (2017)

Após a desmoldagem dos corpos de prova, a partir de 3 CP's para cada teor de ligante foram determinados alguns parâmetros (Figura 35) que permitem conhecer o comportamento volumétrico e determinar o teor ótimo de ligante da mistura.

Figura 35 – Determinação da densidade aparente.



a) Massa seca do CP      b) Volume do CP

Fonte: Autor (2017)

Deste modo, os parâmetros avaliados foram:

- Densidade aparente ( $D_{ap}$ );

$$D_{ap} = \frac{M_s}{V_{cp}} \quad (11)$$

Em que:

$D_{ap}$  – Densidade aparente, determinada em  $\text{g}/\text{cm}^3$ ;

$M_s$  – Massa seca do corpo de prova, determinada em g;

$V_{cp}$  – Volume do corpo de prova, determinado em  $\text{cm}^3$ ,

- Densidade máxima teórica (DMT);

$$DMT = \left( \sum \frac{100}{\frac{\% Mat}{D_{mat}}} \right) \quad (12)$$

Em que:

DMT – Densidade máxima teórica, determinada em g/cm<sup>3</sup>;

% Mat – Porcentagem de cada material do traço da mistura;

Dmat – Densidade correspondente a cada material, determinado em g/cm<sup>3</sup>.

- Volume de vazios (Vv);

$$Vv(\%) = \frac{DMT - Dap}{DMT} \times 100 \quad (13)$$

- Vazios preenchidos de Betume (VCB);

$$VCB = \frac{Dap - \% Lig}{Dlig} \times 100 \quad (14)$$

Em que:

% Lig – Porcentagem de ligante na mistura;

Dlig – Densidade do ligante.

- Vazios do agregado mineral (VAM);

$$VAM = Vv(\%) + VCB(\%) \quad (15)$$

Relação Betume-vazios (RBV);

$$RBV(\%) = \frac{VCB(\%)}{VAM(\%)} \times 100 \quad (16)$$

### 3.3.3.3 Estabilidade Marshall e Fluência

Este ensaio é regido pela norma DNER-ME 043/95, a qual estabelece os procedimentos para a determinação da estabilidade e fluência.

A estabilidade diz respeito a resistência máxima à compressão radial apresentada pelo corpo de prova, enquanto a fluência representa a deformação total apresentada pelo corpo de prova, desde a aplicação da carga inicial nula até a aplicação da carga máxima.

O ensaio procede-se depois de desmoldados os corpos de prova, de maneira que, inicialmente, devem ser feitas quatro aferições diametralmente opostas da altura de cada CP para que seja determinada a altura média. Após isso, eles são deixados em banho-maria a 60°C (±1°C) durante 30 a 40 minutos (Figura 36). Em seguida, cada corpo de prova é colocado no molde de compressão e levado a prensa Marshall para a determinação da estabilidade e fluência (Figura 37).

Figura 36 – Estabilidade Marshall.



a) Banho-maria

b) Molde de compressão

Fonte: Autor (2017)

Assim, faz-se a leitura da prensa ( $L_p$ ) necessária para produzir o rompimento do CP, chamada de “estabilidade lida”, expressa em Kgf. Este valor deve ser corrigido em função da altura média do corpo de prova ( $F_h$ ) e da constante da prensa ( $F_p$ ), conforme a Equação 17.

$$ES = L_p \times F_p \times F_h \quad (17)$$

Em que:

ES – Estabilidade Marshall, determinada em Kgf;

$L_p$  – Leitura da prensa, expressa em Kgf;

$F_p$  – Fator de correção da prensa;

$F_h$  – Fator de correção em função da altura média do corpo de prova e calculada pela Equação 18.

$$F_h = 927,23 \times h^{-1,64} \quad (18)$$

$h$  – Altura média do corpo de prova, determinada em mm.

Figura 37 – Prensa Marshall utilizada para determinação da estabilidade, fluência e resistência à tração.



Fonte: Autor (2017)

### 3.3.3.4 Resistência à tração

O método de execução deste ensaio é seguido conforme a norma DNIT 136/2010, a qual determina a resistência à tração por compressão diametral dos corpos de prova moldados.

Depois de feita a mistura e desmoldado os corpos de prova, é determinado o diâmetro médio de cada corpo de prova (a partir de três medidas de posições paralelas) e a altura média (assim como para a estabilidade, fazendo quatro aferições da altura). Subsequentemente, os CP's são deixados na estufa a 25°C por duas horas. Após isso, são colocados no molde de compressão diametral – que se diferencia do molde de compressão da estabilidade pela presença de dois frisos laterais (Figura 38), e levados a prensa para determinação da carga de ruptura (F), que é lida em Kgf e transformada em N.

Figura 38 – Molde de compressão diametral para determinação da resistência à tração.



Fonte: Autor (2017)

A resistência à tração é calculada de acordo com a Equação 19:

$$RT = \left( \frac{2F}{100 \times \pi \times D \times h} \right) \quad (19)$$

Em que:

RT – Resistência à tração, determinada em Mpa;

F – Leitura da prensa, expressa em N;

D – Diâmetro do corpo de prova, em cm;

h – Altura do corpo de prova, em cm.

### 3.3.3.5 Ensaio Lottman

O ensaio Lottman, também conhecido como perda por umidade induzida, tem como objetivo avaliar os danos nas misturas asfálticas causado pela umidade - esta que afeta o desempenho e a vida de serviço dos pavimentos. O ensaio é regido pela norma AASHTO T 283.

Para a realização do ensaio são necessários seis CP's, de modo que três serão determinados a resistência a tração não condicionado (RT) e os outros três a resistência a tração após o ciclo de condicionamento (RT<sub>u</sub>). A começar, os corpos de prova para o ensaio devem ter um volume de vazios entre 6% e 8%. Para tanto, é necessário encontrar um número de golpes que se atinja essa porcentagem de vazios, sendo então moldados diferentes corpos de prova para diferentes número de golpes, o que permite plotar um gráfico (nº de golpes versus Vv) e calcular o número de golpes ideal para se alcançar os vazios desejados. Depois de definido isso, procede-se o ensaio moldando os CP's.

Inicialmente são moldados os corpos de prova com cerca de 1200 g em peso conforme o traço e o teor de ligante de projeto encontrado, respeitando o volume de vazios de 6% a 8%. Depois de desmoldados os CP's, separa-se o primeiro conjunto com três CP's, devendo ser colocados em sacos plásticos para proteção e imersão em banho de água a 25°C por 2 horas (±1 hora) e, em seguida, realizado o ensaio de resistência à tração (RT).

O segundo conjunto com os outros 3 CP's serão submetidos ao condicionamento, que consiste em colocá-los em um recipiente em água destilada aplicando um vácuo a uma pressão de 250 mmHg a 650 mmHg por 5 a 10 minutos (Figura 39a), para que se obtenha um grau de saturação em torno de 55% a 80% de água, sendo calculado conforme a Equação 20:

$$S(\%) = \left( \frac{Pf - Pi}{Vv \times Pi} \right) \times 100 \quad (20)$$

Em que:

S (%) – Grau de saturação, determinada em %;

Pi – Peso inicial seco do corpo de prova, expresso em g;

Pf – Peso final do corpo de prova após o vácuo, expresso em g;

Vv – Volume de vazios, expresso em %.

Figura 39 - Saturação e envolvimento dos CP's com filme e saco plástico para congelamento.



a) Saturação dos CP's

b) Envolvimento dos CP's

Fonte: Autor (2017)

Após de definido o grau de saturação, os CP's são envoltos por um filme plástico e colocado em um saco plástico com 10 ml de água destilada (Figura 40), sendo vedados e levados ao congelamento a  $-18^{\circ}\text{C}$  por um período mínimo de 16 horas. Em seguida, este conjunto é colocado em um banho a  $60^{\circ}\text{C}$  por um período de 24 horas ( $\pm 1$  hora), sendo retirados do saco e filme plástico após a imersão. Depois do banho a  $60^{\circ}\text{C}$ , os CP's são imersos em um novo banho a  $25^{\circ}\text{C}$  por um período de 2 horas ( $\pm 1$  hora), conforme apresentado na Figura 39b. Por fim, realiza-se o ensaio de resistência a tração após o condicionamento ( $RT_u$ ) e calcula-se a resistência à tração retida por umidade induzida (RRT) através da Equação 21:

$$RRT(\%) = \left( \frac{RT_u}{RT} \right) \times 100 \quad (21)$$

Em que:

RRT (%) – Resistência à tração por umidade induzida, determinada em %;

RT – Resistência a tração não condicionado, expresso em Mpa;

$RT_u$  – Resistência a tração após o condicionamento, expresso em Mpa.

Figura 40 - Execução do ensaio Lottman.



a) CP's congelados

b) Banho a 60°C

c) Banho a 25°C

Fonte: Autor (2017)

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Após de realizados todos os ensaios e procedimentos necessários neste estudo, serão apresentados a seguir as discussões e os resultados acerca da mistura asfáltica em questão. Além disso, será feita uma comparação com outros estudos os quais trataram de revestimentos asfálticos tipo SMA com diferentes agentes estabilizadores (fibras alternativas ou asfaltos modificados)

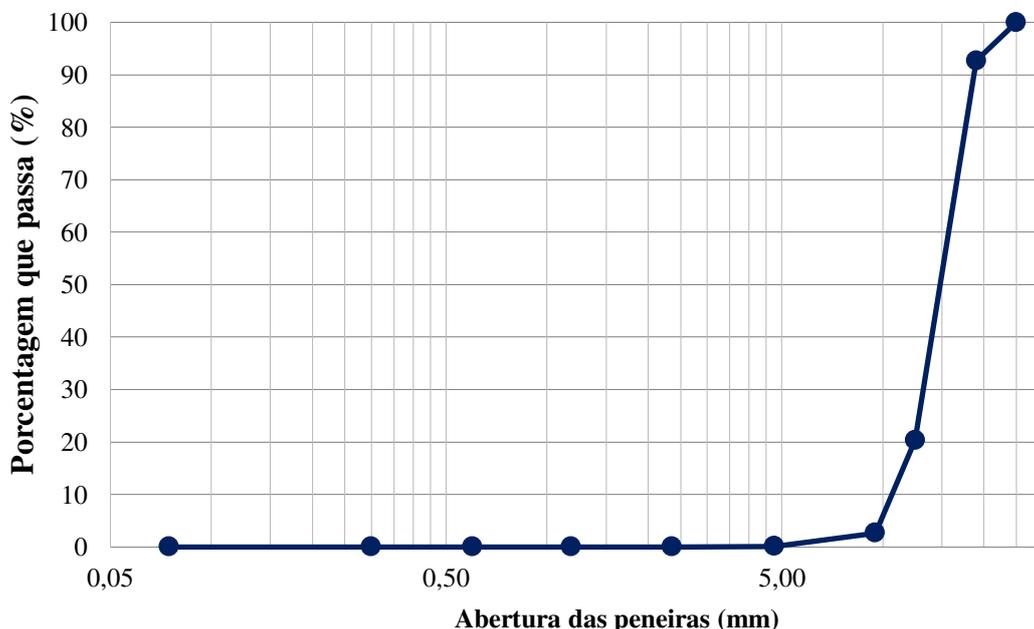
### 4.1 Resultados dos ensaios nos agregados

Os ensaios realizados nos agregados foram percorridos ao longo da metodologia (item 3.3.1) e os resultados serão apresentados a seguir.

#### 4.1.1 Granulometria

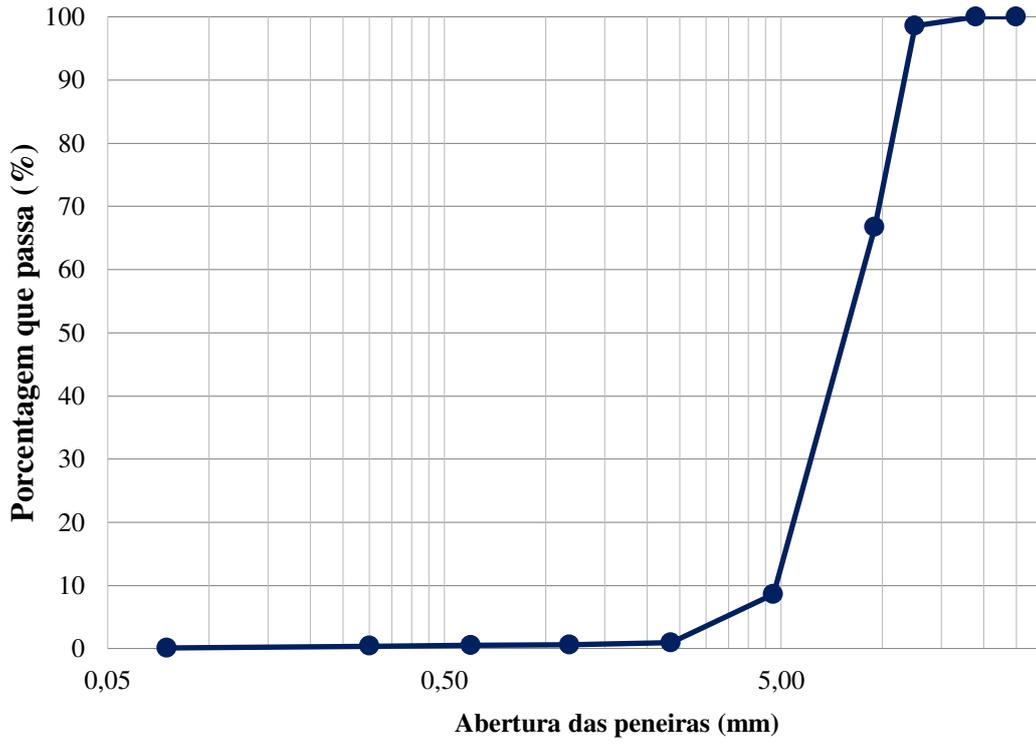
Para todos os agregados e o fíler foi feita a granulometria a fim de que pudesse ser feito, ao final, o enquadramento granulométrico de acordo com a faixa de trabalho escolhida. A Tabela 13 resume a granulometria feita dos materiais e os Gráficos de 1 a 4 mostram a disposição dos grãos de cada agregado por meio da porcentagem passante e a respectiva peneira.

Gráfico 1 - Granulometria da brita 1.



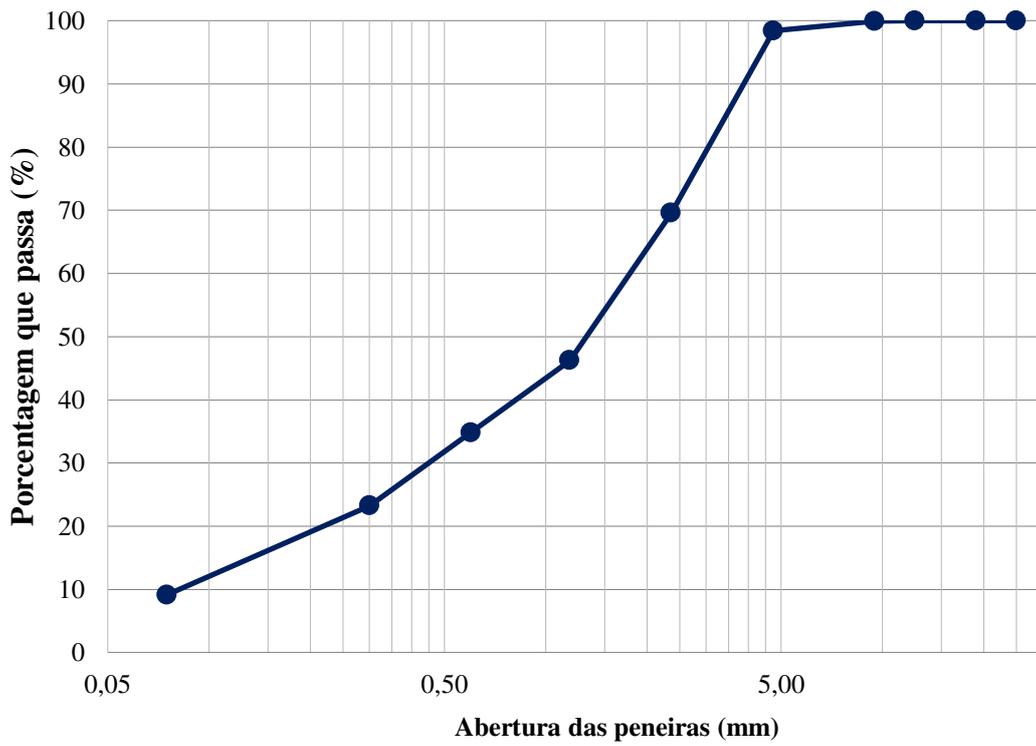
Fonte: Autor (2017)

Gráfico 2 - Granulometria da brita 0.

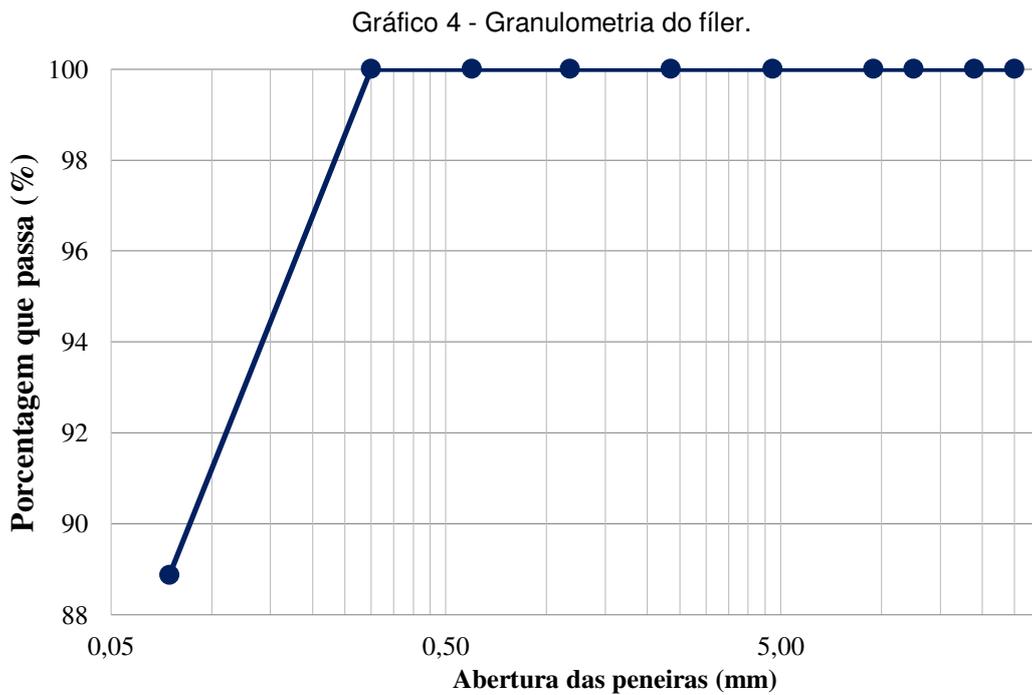


Fonte: Autor (2017)

Gráfico 3 - Granulometria do pó de brita.



Fonte: Autor (2017)



Fonte: Autor (2017)

Tabela 13 – Resumo da granulometria dos agregados.

Malhas		Porcentagem que passa			
Nº	mm	Brita 1	Brita 0	Pó de brita	Fíler
1	37,500	-	-	-	-
1"	25,000	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%
3/4"	19,000	92,67%	100,00%	100,00%	100,00%
1/2"	12,500	20,33%	98,58%	100,00%	100,00%
3/8"	9,500	2,65%	66,75%	99,91%	100,00%
Nº 4	4,750	0,07%	8,60%	98,40%	100,00%
Nº 8	2,360	0,00%	0,95%	69,53%	100,00%
Nº 16	1,180	0,00%	0,58%	46,20%	100,00%
Nº30	0,600	0,00%	0,52%	34,80%	100,00%
Nº 50	0,300	0,00%	0,39%	23,23%	100,00%
Nº 200	0,075	0,00%	0,07%	9,12%	88,87%

Fonte: Autor (2017)

Concluído o estudo granulométrico dos agregados, de acordo com as faixas granulométricas da AASHTO MP8-01 (Tabela 4) enquadrou-se as frações na faixa de 19 mm. Assim, encontrou-se o traço de agregados para 54% de brita 1, 23% de brita 0, 14% de pó de brita e 9% de fíler, conforme mostra a Tabela 14. O

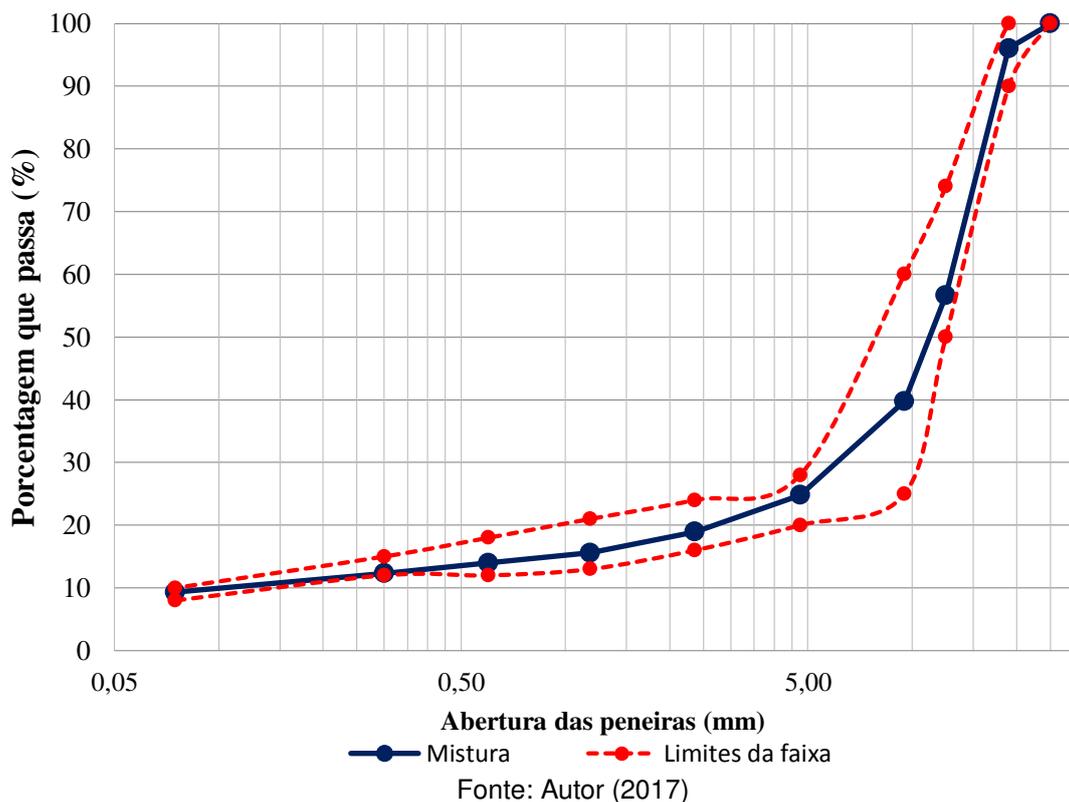
Gráfico 5 apresenta a curva granulométrica do traço de agregados em meio aos limites definidos para a faixa de trabalho adotada de 19 mm.

Tabela 14 – Traços de agregados segundo a faixa de 19 mm da AASHTO MP8-01.

Malhas	Porcentagem que passa	Faixa granulométrica				Limite ideal	Mistura
		Brita 1	Brita 0	Pó de brita	Filer		
Nº	mm						
1 1/2"	37,500	-	-	-	-	-	-
1"	25,000	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%
3/4"	19,000	92,67%	100,00%	100,00%	100,00%	90,00%	100,00%
1/2"	12,500	20,33%	98,58%	100,00%	100,00%	50,00%	74,00%
3/8"	9,500	2,65%	66,75%	99,91%	100,00%	25,00%	60,00%
Nº 4	4,750	0,07%	8,60%	98,40%	100,00%	20,00%	28,00%
Nº 8	2,360	0,00%	0,95%	69,53%	100,00%	16,00%	24,00%
Nº 16	1,180	0,00%	0,58%	46,20%	100,00%	13,00%	21,00%
Nº 30	0,600	0,00%	0,52%	34,80%	100,00%	12,00%	18,00%
Nº 50	0,300	0,00%	0,39%	23,23%	100,00%	12,00%	15,00%
Nº 200	0,075	0,00%	0,07%	9,12%	88,87%	8,00%	10,00%
Traço		54,00%	23,00%	14,00%	9,00%		

Fonte: Autor (2017)

Gráfico 5 - Granulometria da mistura.



#### 4.1.2 Resistência à abrasão “Los Angeles”

O ensaio de abrasão foi realizado nos agregados graúdos (brita 1 e brita 0). As especificações para o SMA (conforme a Tabela 2) exigem uma abrasão a Los Angeles máxima de 30%. A Tabela 15 resume os resultados do ensaio, evidenciando que os materiais empregados atendem satisfatoriamente ao valor máximo especificado.

Tabela 15 – Resultados da resistência à abrasão a Los Angeles.

<b>Descrição</b>	<b>Brita 1</b>	<b>Brita 0</b>
Graduação	B	C
Mn (g)	5000,0	5000,0
Mn' (g)	4436,0	4114,2
An (%)	<b>11,28</b>	<b>17,716</b>

Fonte: Autor (2017)

#### 4.1.3 Absorção

Com o ensaio de absorção verificou-se que os materiais ensaiados (Brita 1 e brita 0) apresentam uma porosidade aceitável, visto que a especificação (Tabela 2) define um valor de absorção máximo de 2%. Portanto, os valores encontrados após o ensaio estão representados na Tabela 16 a seguir.

Tabela 16 – Resultados da absorção.

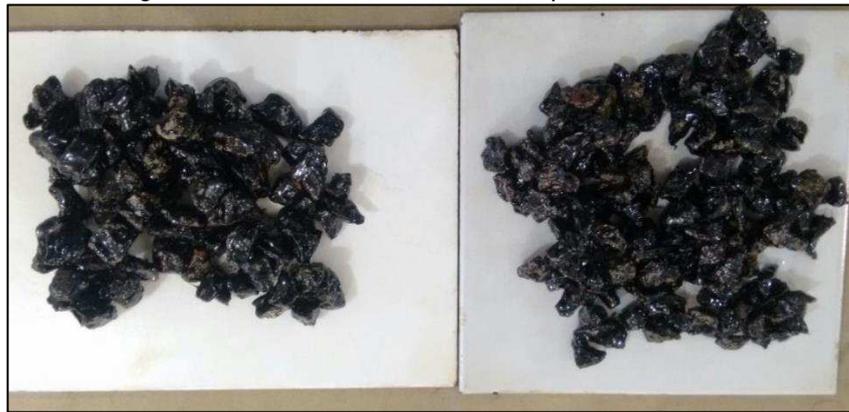
<b>Descrição</b>	<b>Brita 1</b>	<b>Brita 0</b>
Ms (g)	2844,9	1995,3
Mh (g)	2853,3	2007,4
a (%)	<b>0,29</b>	<b>0,60</b>

Fonte: Autor (2017)

#### 4.1.4 Adesividade

A análise do resultado do ensaio de adesividade é feita visualmente e dito como satisfatório quando não houver nenhum deslocamento de película betuminosa, ao fim de 72 horas. Contudo, após esse período constatou-se que os agregados graúdos ensaiados demonstram ser insatisfatórios, visto que houve desprendimento da película de ligante, conforme evidenciado na Figura 41.

Figura 41 – Ensaio de adesividade após as 72 horas.



Fonte: Autor (2017)

#### 4.1.5 Índice de forma

O ensaio de índice de forma diz respeito ao quão cúbico é o grão. Assim, quanto mais próximo de 1,0 melhor é a cubicidade do agregado. O ensaio foi realizado para a brita 1 e os valores das determinações das razões (b/a) e (c/b) estão presentes no Apêndice A. As médias obtidas foram, respectivamente, 0,712 e 0,662, classificando-se quanto à forma, de acordo com a Tabela 9, como cúbicos.

#### 4.1.6 Angularidade do agregado fino (FAA)

O ensaio de angularidade foi realizado para o pó de brita (areia britada) e para amostras de areia natural distintas, sendo a areia 1 e a areia 2 doadas por empresas do ramo rodoviário e a areia 3 proveniente do estoque do LSP. No Apêndice B estão presentes os cálculos para a determinação da densidade dos materiais – que fora determinada pelo método do picnômetro, e os cálculos para a determinação da angularidade. Os resultados do FAA estão apresentados na Tabela 17.

Tabela 17 – Resultados da angularidade.

<b>Agregado</b>	<b>FAA</b>
Pó de brita	49,40%
Areia 1	39,12%
Areia 2	39,27%
Areia 3	39,83%

Fonte: Autor (2017)

De acordo com os resultados obtidos, percebeu-se que, conforme a especificação para o agregado miúdo (Tabela 5), as areias naturais ensaiadas não satisfazem o mínimo estabelecido de 45%. Portanto, na mistura asfáltica optou-se em excluir a areia natural e utilizar somente a areia britada (pó de brita), seguindo as recomendações para o uso de 100% de agregados britados, conforme Neves filho (2004) e Reis (2002).

#### 4.1.7 Equivalente de areia

O ensaio de equivalente de areia é determinado a partir da média de três determinações e demonstra-se satisfatório quando apresenta resultados iguais ou superiores a 55%. De acordo com os resultados obtidos (Tabela 18) apenas a areia 3 não apresentou um equivalente adequado. Os cálculos para a determinação do EA estão presentes no Apêndice C.

Tabela 18 – Resultados do equivalente de areia.

<b>Agregado</b>	<b>EA</b>
Pó de brita	68%
Areia 1	71%
Areia 2	70%
Areia 3	51%

Fonte: Autor (2017)

#### 4.1.8 Massa específica

As massas específicas dos materiais foram determinadas de acordo com o método recomendado para cada material. A Tabela 19 apresenta os valores encontrados conforme o respectivo método e, as determinações de cada um estão no Apêndice D.

Tabela 19 - Resultados das massas específicas dos materiais.

<b>Material</b>	<b>Método</b>	<b>Norma</b>	<b>Massa específica (g/cm<sup>3</sup>)</b>
Brita 1	Método do cesto	DNER-ME 081/98	2,797
Brita 0	Método do cesto	DNER-ME 081/98	2,764
Pó de brita	Frasco Chapman	DNER-ME 194/98	2,775
Fíler	Frasco Le Chatelier	DNER-ME 085/94	2,993

Fibra de sisal Método do picnômetro DNER-ME 084/95 1,670

Fonte: Autor (2017)

## 4.2 Resultados dos ensaios no ligante asfáltico

Nesta seção serão apresentados os resultados dos ensaios realizados no LSP para o CAP 50/70 utilizado na pesquisa. Quanto ao ECOFLEX B, os ensaios foram desenvolvidos pela GRECA Asfaltos conforme Elias (2016) e, os resultados da viscosidade para a determinação das temperaturas de mistura e compactação foram apresentados na Tabela 11. A Tabela 20 a seguir resume a caracterização do ECOFLEX B.

Tabela 20 - Caracterização do ECOFLEX B.

Ensaio	Norma	Especificação	Resultados
Penetração, 0,1 mm	NBR 6576	30 a 70	49,5
Ponto de amolecimento, °C	NBR 6560	55 (mínimo)	57,0
Recuperação elástica, %	NLT 329/91	50 (mínimo)	69,0
Ponto de fulgor, °C	NBR 11341	235 (mínimo)	> 240
Densidade relativa, 25°C/25°C	NBR 6296	Anotar	1,031
Viscosidade Brookfield à 175°C	ASTM D 2196-99	800 - 2000	1505,0
Temperatura de carregamento, °C	-	Anotar	175

Fonte: GRECA ASFALTOS (2015 apud ELIAS, 2016)

### 4.2.1 Ensaio de penetração

A penetração é expressa em décimos de milímetro a partir da média de três determinações. O resultado obtido para a penetração do CAP ensaiado (Tabela 21), classificam-no, de acordo com a norma DNIT 095/2006, como CAP 50/70.

Tabela 21 - Resultado do ensaio de penetração.

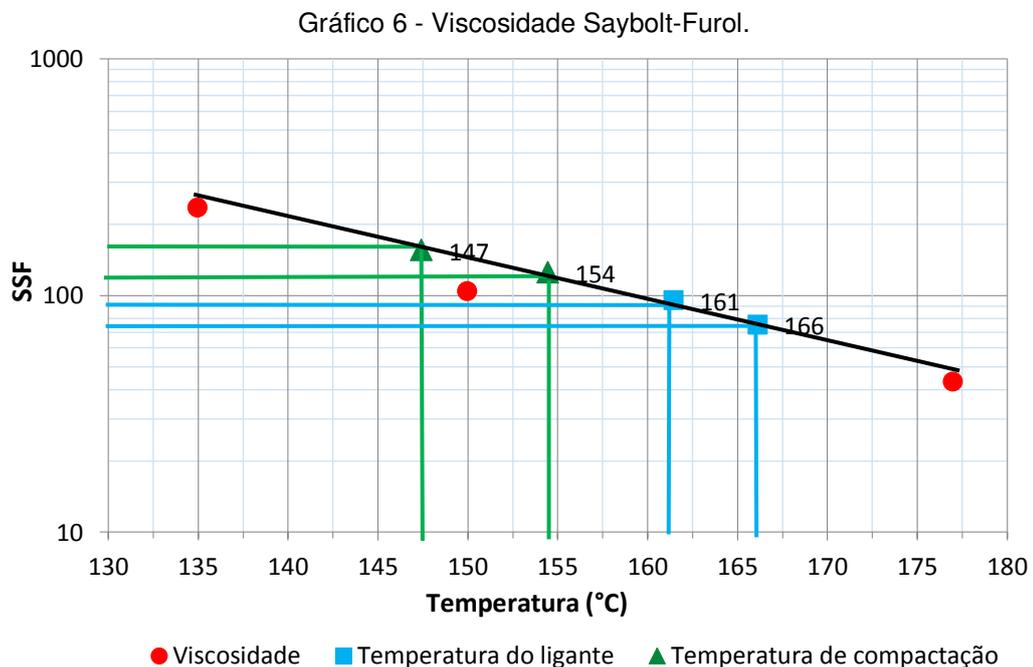
Descrição	Li (0,1 mm)	Lf (0,1 mm)	P' (0,1 mm)	P (mm)
1ª Determinação	263	316	53	
2ª Determinação	295	349	55	54
3ª Determinação	223	278	56	

Fonte: Autor (2017)

#### 4.2.2 Ensaio de viscosidade Saybolt-Furol

Com o ensaio de viscosidade determinou-se as temperaturas de mistura e compactação do CAP 50/70 apresentadas na Tabela 12.

A temperatura do ligante foi definida para uma viscosidade entre 75 SSF e 95 SSF, obtendo-se uma faixa de temperatura de 161°C a 166°C (adotou-se então como padrão 165°C). A temperatura dos agregados fixada foi de 175°C (10°C acima da temperatura do ligante). Para a compactação, estabeleceu-se a temperatura a partir de uma viscosidade entre 125 SSF e 155 SSF, resultando em uma faixa de 147°C a 154°C, sendo definida como padrão 150°C. Os resultados foram determinados através do Gráfico 6.



Fonte: Autor (2017)

Os pontos de temperatura nos quais foram avaliadas a viscosidade foram 135°C, 150°C e 177°C. A norma DNIT 095/2006 especifica os valores mínimos para a viscosidade nesses pontos de análise, conforme apresentado na Tabela 22. Assim, percebe-se que a os valores da viscosidade (SSF) encontrados atendem a exigência.

Tabela 22 - Resultados da viscosidade Saybolt-Furol.

<b>Temperatura (°C)</b>	<b>Valores encontrados (SSF)</b>	<b>CAP 50/70 - DNIT 095/2006 (SSF)</b>
135°C	234	141 mín
150°C	104	50 mín
177°C	43	30 - 150

Fonte: Autor (2017)

#### 4.2.3 Ensaio de ponto de amolecimento

Para o ponto de amolecimento, o mínimo especificado que o CAP 50/70 deve atingir é 46°C. O resultado é definido pela média aritmética entre as duas temperaturas encontradas no instante que cada bola tocou o a placa inferior e, de acordo com a Tabela 23, o valor médio encontrado demonstra-se satisfatório.

Tabela 23 - Resultado para o ponto de amolecimento.

<b>T<sub>1</sub> (°C)</b>	<b>T<sub>2</sub> (°C)</b>	<b>T<sub>médio</sub> (°C)</b>
52	53	52,5

Fonte: Autor (2017)

### 4.3 Resultados dos ensaios na mistura asfáltica

Depois de realizados e analisados os resultados dos ensaios com os agregados e o ligante, nesta seção, serão discutidos os resultados obtidos nos ensaios da mistura asfáltica. De início, será avaliado o teor de fibra ideal para diferentes teores de CAP e para o asfalto-borracha (ECOFLEX B) através do ensaio de escorrimento. Em seguida, com a dosagem Marshall serão avaliados os parâmetros volumétricos e mecânicos da mistura, bem como será definido o teor ótimo de ligante.

#### 4.3.1 Ensaio de escorrimento

O ensaio de escorrimento foi inicialmente realizado para o CAP 50/70. As recomendações para a porcentagem de fibra de celulose na mistura sugerem valores entre 0,3% a 0,5%, conforme a Tabela 6. Assim, partiu-se do menor teor de

CAP (6%) para o maior valor recomendado de fibra (0,5%), encontrando-se um escorrimento do ligante aquém do limite máximo estabelecido de 0,3%. Assim, realizou-se o ensaio para 6%, 6,5% e 7% de CAP variando as porcentagens de fibra de 0,5% a no máximo 2%. A Tabela 24 apresenta estes resultados e no Apêndice E estão esmiuçadas as determinações do escorrimento.

Tabela 24 - Escorrimento para o CAP 50/70.

<b>% de fibra de sisal</b>	<b>6% de CAP</b>	<b>6,5% de CAP</b>	<b>7% de CAP</b>
<b>0,5</b>	0,79%	-	-
<b>1,0</b>	0,40%	0,58%	0,68%
<b>1,5</b>	0,08%	0,17%	0,19%
<b>2,0</b>	-	0,07%	0,08%

Fonte: Autor (2017)

Portanto, a partir dos resultados obtidos para o CAP 50/70, verificou-se que para todos os teores de ligante analisados, 1,5% de fibra de sisal apresentou um escorrimento satisfatório de acordo com o limite especificado, sendo assim, definiu-se como o teor ideal o valor de 1,5% de fibra de sisal.

Para o ECOFLEX B, devido à pouca quantidade de material disponível para o desenvolvimento da pesquisa, foi realizado o ensaio apenas para a maior porcentagem de asfalto-borracha a ser utilizada na dosagem (7%). Quanto ao teor de fibra de sisal, foram testados para 0,3% e 0,5%, conforme o recomendado. Os resultados estão detalhados no Apêndice F e foram resumidos na Tabela 25.

Tabela 25 - Escorrimento para o ECOFLEX B.

<b>% de fibra de sisal</b>	<b>7% de ECOFLEX B</b>
<b>0,3</b>	0,13%
<b>0,5</b>	0,09%

Fonte: Autor (2017)

Com dos resultados atingidos para o escorrimento do ECOFLEX B, percebe-se que tanto 0,3% como 0,5% de fibra de sisal apresentam um escorrimento do ligante satisfatório. Portanto, para o asfalto-borracha, adotou-se como o teor de fibra de sisal ideal o valor intermediário de 0,4%.

### 4.3.2 Dosagem Marshall

A dosagem Marshall foi utilizada para moldagem dos corpos de prova e determinação do teor ótimo de ligante por meio análise dos parâmetros volumétricos, bem como para avaliação das propriedades mecânicas.

#### 4.3.2.1 CAP 50/70

Como dito no item 3.3.3.2, para o CAP 50/70 foram moldados, inicialmente, seis corpos de prova para cada teor de ligante, sendo os teores de 6%, 6,5% e 7%. Dos seis CP's moldados, metade destinou-se a determinação dos parâmetros volumétricos e estabilidade Marshall/fluência e a outra metade para a resistência à tração. Como definido no ensaio de escorrimento do ligante, para o CAP trabalhou-se com 1,5% de fibras. As Tabelas de 26 a 28 apresentam as determinações das densidades e parâmetros volumétricos referentes a cada teor de cimento asfáltico trabalhado.

Tabela 26 - Resultados dos parâmetros volumétricos e densidades para 6% de CAP 50/70.

	CP 1	CP 2	CP 3	Média
<b>Ms (g)</b>	1197,6	1197,5	1191,7	-
<b>Vcp (cm<sup>3</sup>)</b>	512,2	506,0	511,7	-
<b>Dap (g/cm<sup>3</sup>)</b>	2,338	2,367	2,329	<b>2,345</b>
<b>Vv (%)</b>	7,24%	6,11%	7,61%	<b>6,98%</b>
<b>VCB (%)</b>	13,42%	13,58%	13,36%	<b>13,45%</b>
<b>VAM (%)</b>	20,65%	19,69%	20,97%	<b>20,44%</b>
<b>RBV (%)</b>	64,95%	68,97%	63,73%	<b>65,88%</b>
<b>DMT = 2,521 (g/cm<sup>3</sup>)</b>				

Fonte: Autor (2017)

Tabela 27 - Resultados dos parâmetros volumétricos e densidades para 6,5% de CAP 50/70.

	CP 1	CP 2	CP 3	Média
<b>Ms (g)</b>	1204,6	1187,6	1193,8	-
<b>Vcp (cm<sup>3</sup>)</b>	506,7	506,0	509,2	-
<b>Dap (g/cm<sup>3</sup>)</b>	2,377	2,347	2,344	<b>2,356</b>
<b>Vv (%)</b>	4,96%	6,18%	6,28%	<b>5,81%</b>
<b>VCB (%)</b>	14,78%	14,59%	14,57%	<b>14,65%</b>
<b>VAM (%)</b>	19,74%	20,77%	20,85%	<b>20,45%</b>
<b>RBV (%)</b>	74,85%	70,26%	69,89%	<b>71,67%</b>

**DMT = 2,502 (g/cm<sup>3</sup>)**

Fonte: Autor (2017)

Tabela 28 - Resultados dos parâmetros volumétricos e densidades para 7% de CAP 50/70.

	<b>CP 1</b>	<b>CP 2</b>	<b>CP 3</b>	<b>Média</b>
<b>Ms (g)</b>	1179,2	1185,1	1171,3	-
<b>Vcp (cm<sup>3</sup>)</b>	504,6	500,7	498,3	-
<b>Dap (g/cm<sup>3</sup>)</b>	2,337	2,367	2,351	<b>2,359</b>
<b>Vv (%)</b>	5,87%	4,67%	5,32%	<b>5,29%</b>
<b>VCB (%)</b>	15,64%	15,84%	15,74%	<b>15,74%</b>
<b>VAM (%)</b>	21,52%	20,51%	21,06%	<b>21,03%</b>
<b>RBV (%)</b>	72,70%	77,25%	74,72%	<b>74,89%</b>

**DMT = 2,483 (g/cm<sup>3</sup>)**

Fonte: Autor (2017)

Além dos parâmetros volumétricos e densidades, ainda foram determinadas as propriedades mecânicas para cada porcentagem de CAP analisado, cujos valores médios estão resumidos na Tabela 29. Os resultados completos constam no Apêndice G.

Tabela 29 - Resultados da estabilidade, fluência e resistência à tração para o CAP 50/70.

<b>Descrição</b>	<b>Teores de CAP</b>		
	<b>6%</b>	<b>6,5%</b>	<b>7%</b>
<b>ES (Kgf)</b>	723,763	734,17	722,44
<b>Fluência (mm)</b>	20,86	20,38	20,96
<b>RT (Mpa)</b>	1,19	0,99	0,95

Fonte: Autor (2017)

Para a determinação do teor de CAP de projeto, a especificação do SMA (Tabela 1) exige um volume de vazios de 4%. Com os resultados apresentados nas Tabelas 26 a 28, percebe-se que o Vv se encontra elevado e distante do necessário. Portanto, decidiu-se moldar mais corpos de prova para teores maiores de ligante. Assim, foram moldados três CP's para cada teor de 7,5% e 8% de CAP, com vistas à análise somente da estabilidade/fluência e dos parâmetros volumétricos - cujos resultados estão representados nas Tabelas 30 e 31 a seguir.

Tabela 30 - Resultados dos parâmetros volumétricos e densidades para 7,5% de CAP 50/70.

	<b>CP 1</b>	<b>CP 2</b>	<b>CP 3</b>	<b>Média</b>
<b>Ms (g)</b>	1183,1	1164,0	1160,1	-
<b>Vcp (cm<sup>3</sup>)</b>	500,9	493,1	493,2	-
<b>Dap (g/cm<sup>3</sup>)</b>	2,362	2,361	2,352	<b>2,358</b>
<b>Vv (%)</b>	4,15%	4,21%	4,55%	<b>4,30%</b>
<b>VCB (%)</b>	16,94%	16,93%	16,87%	<b>16,91%</b>
<b>VAM (%)</b>	21,09%	21,14%	21,42%	<b>21,22%</b>
<b>RBV (%)</b>	80,32%	80,10%	78,77%	<b>79,73%</b>
<b>DMT =</b>		<b>2,464 (g/cm<sup>3</sup>)</b>		

Fonte: Autor (2017)

Tabela 31 - Resultados dos parâmetros volumétricos e densidades para 8% de CAP 50/70.

	<b>CP 1</b>	<b>CP 2</b>	<b>CP 3</b>	<b>Média</b>
<b>Ms (g)</b>	1179,2	1153,9	1153,0	-
<b>Vcp (cm<sup>3</sup>)</b>	502,5	490,0	486,6	-
<b>Dap (g/cm<sup>3</sup>)</b>	2,347	2,355	2,370	<b>2,357</b>
<b>Vv (%)</b>	4,06%	3,73%	3,13%	<b>3,64%</b>
<b>VCB (%)</b>	17,95%	18,02%	18,13%	<b>18,03%</b>
<b>VAM (%)</b>	22,02%	21,74%	21,26%	<b>21,67%</b>
<b>RBV (%)</b>	81,55%	82,86%	85,28%	<b>83,23%</b>
<b>DMT =</b>		<b>2,446 (g/cm<sup>3</sup>)</b>		

Fonte: Autor (2017)

Quanto aos resultados encontrados para as estabilidades dos novos dois teores de CAP (Tabelas 32 e 33), percebeu-se que houve uma queda abrupta dos valores, o que demonstra ser incomum. Assim como será visto adiante, com o asfalto-borracha aconteceu o mesmo. Esses corpos de prova moldados para os teores de 7,5% e 8% de CAP 50/70, assim como todos os CP's com o ECOFLEX B foram rompidos nos dias seguintes aos primeiros CP's (com 6%, 6,5% e 7% de CAP). Portanto, supõe-se que, nesse interim, pode ter ocorrido algum problema relativo a calibragem do equipamento utilizado para a determinação da estabilidade, justificando os resultados atípicos obtidos de todos os corpos de prova rompidos após os primeiros que apresentaram valores contundentes.

Tabela 32 - Resultados da estabilidade e fluência para 7,5% de CAP 50/70.

	CP 1	CP 2	CP 3	Média
H (mm):	67,5	66,4	65,1	-
Fh	0,926	0,953	0,985	-
Fp	2,0154	2,0154	2,0154	-
Lp	115,00	100,00	105,00	-
ES (Kgf)	214,71	192,02	208,46	<b>205,06</b>
Fluência (mm)	10,27	9,66	8,93	<b>9,62</b>

Fonte: Autor (2017)

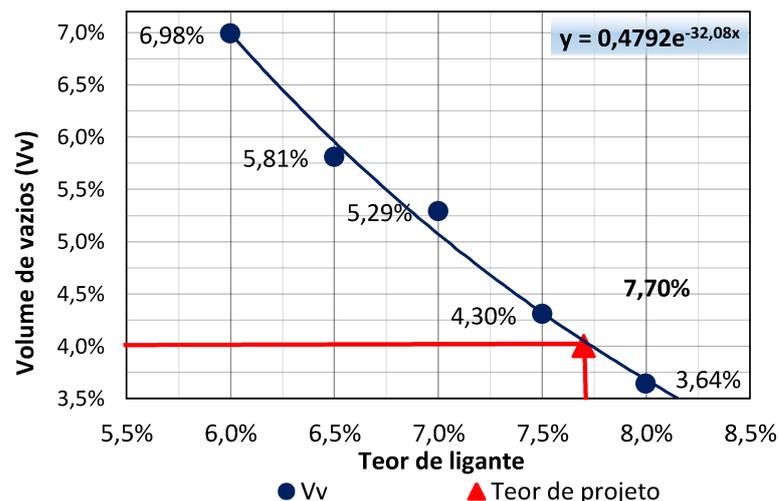
Tabela 33 - Resultados da estabilidade e fluência para 8% de CAP 50/70.

	CP 1	CP 2	CP 3	Média
H (mm):	68,2	67,4	65,3	-
Fh	0,912	0,929	0,980	-
Fp	2,0154	2,0154	2,0154	-
Lp	110,00	105,00	97,00	-
ES (Kgf)	202,12	196,60	191,61	<b>196,77</b>
Fluência (mm)	9,85	8,13	10,45	<b>9,48</b>

Fonte: Autor (2017)

Considerando os resultados para os volumes de vazios correspondentes aos 5 teores de ligante trabalhados, determinou-se o teor de projeto referente a 4% de vazios, sendo definido, então, o teor ideal de 7,7% de CAP 50/70, conforme o Gráfico 7.

Gráfico 7 - Determinação do teor de CAP de projeto.



Fonte: Autor (2017)

Por fim, moldaram-se seis corpos de prova para o teor de projeto do CAP 50/70 definido a fim de conhecer o comportamento da mistura asfáltica em questão, sendo determinados os parâmetros volumétricos e as propriedades mecânicas, conforme apresentado nas Tabelas 34 e 35.

Tabela 34 - Resultados dos parâmetros volumétricos para o teor de projeto do CAP 50/70.

	<b>CP 1</b>	<b>CP 2</b>	<b>CP 3</b>	<b>Média</b>
<b>Ms (g)</b>	1190,4	1187,6	1181,5	-
<b>Vcp (cm<sup>3</sup>)</b>	506,2	504,2	499,0	-
<b>Dap (g/cm<sup>3</sup>)</b>	2,352	2,355	2,368	<b>2,358</b>
<b>Vv (%)</b>	4,29%	4,13%	3,63%	<b>4,02%</b>
<b>VCB (%)</b>	17,32%	17,34%	17,44%	<b>17,37%</b>
<b>VAM (%)</b>	21,60%	21,48%	21,07%	<b>21,38%</b>
<b>RBV (%)</b>	80,16%	80,76%	82,77%	<b>81,23%</b>
<b>DMT =</b>		<b>2,457 (g/cm<sup>3</sup>)</b>		

Fonte: Autor (2017)

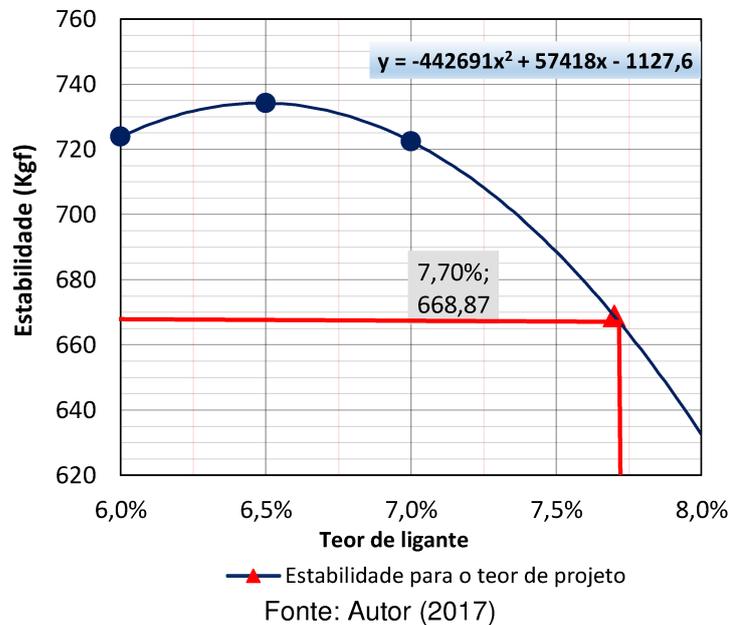
Tabela 35 - Resultados da estabilidade, fluência e resistência à tração para o teor de projeto do CAP 50/70.

	<b>CP 1</b>	<b>CP 2</b>	<b>CP 3</b>	<b>CP 4</b>	<b>CP 5</b>	<b>CP 6</b>	<b>Média</b>
<b>H (cm):</b>	-	-	-	68,23	67,17	69,45	-
<b>D (cm):</b>	-	-	-	10,17	10,20	10,16	-
<b>Fh</b>	0,912	0,929	0,980	-	-	-	-
<b>Fp</b>	2,0154	2,0154	2,0154	-	-	-	-
<b>Lp</b>	105,0	110,0	105,0	350,0	340,0	360,0	-
<b>ES (Kgf)</b>	191,60	199,48	205,42	-	-	-	<b>198,83</b>
<b>Fluência (mm)</b>	8,08	9,37	10,86	-	-	-	<b>9,44</b>
<b>F (N)</b>	-	-	-	6919,88	6722,17	7117,59	-
<b>RT (Mpa)</b>	-	-	-	0,63	0,62	0,64	<b>0,63</b>

Fonte: Autor (2017)

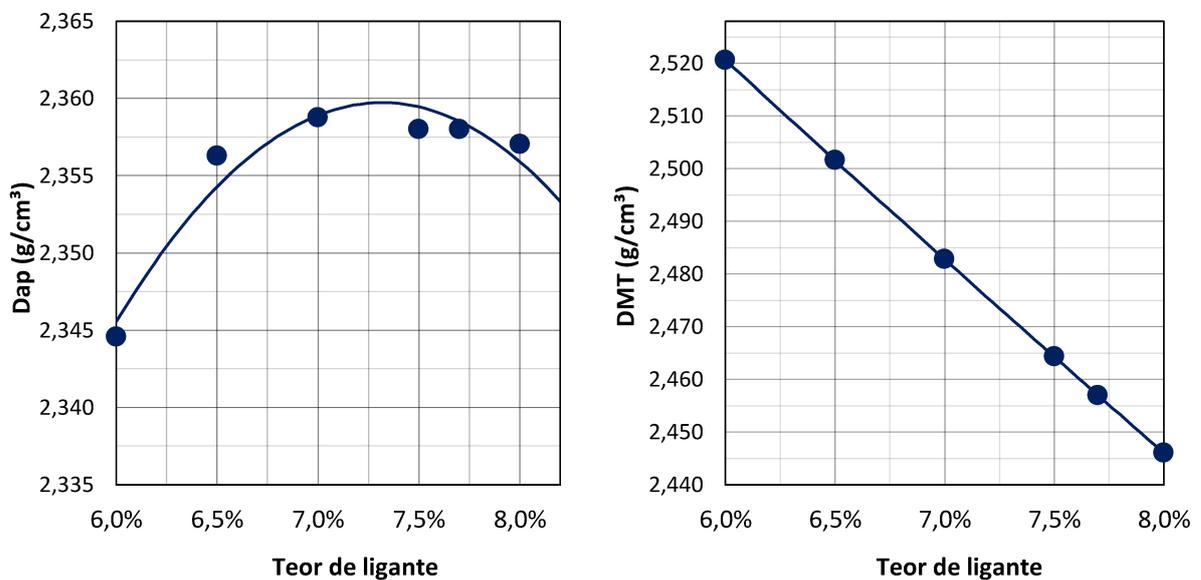
Quanto a estabilidade Marshall, novamente os resultados apresentados foram incomuns devido a possíveis problemas com o equipamento, conforme fora discutido. Assim, foram desprezadas estas determinações referentes aos teores de ligante de 7,5%, 8% e do teor de projeto (7,7%). Deste modo, a partir dos resultados iniciais dos corpos de prova moldados para 6%, 6,5% e 7% de CAP, estimaram-se os valores da estabilidade para o teor de 7,7% de projeto, de acordo com o Gráficos 8 a seguir.

Gráfico 8 - Determinação da estabilidade para o teor de CAP de projeto.



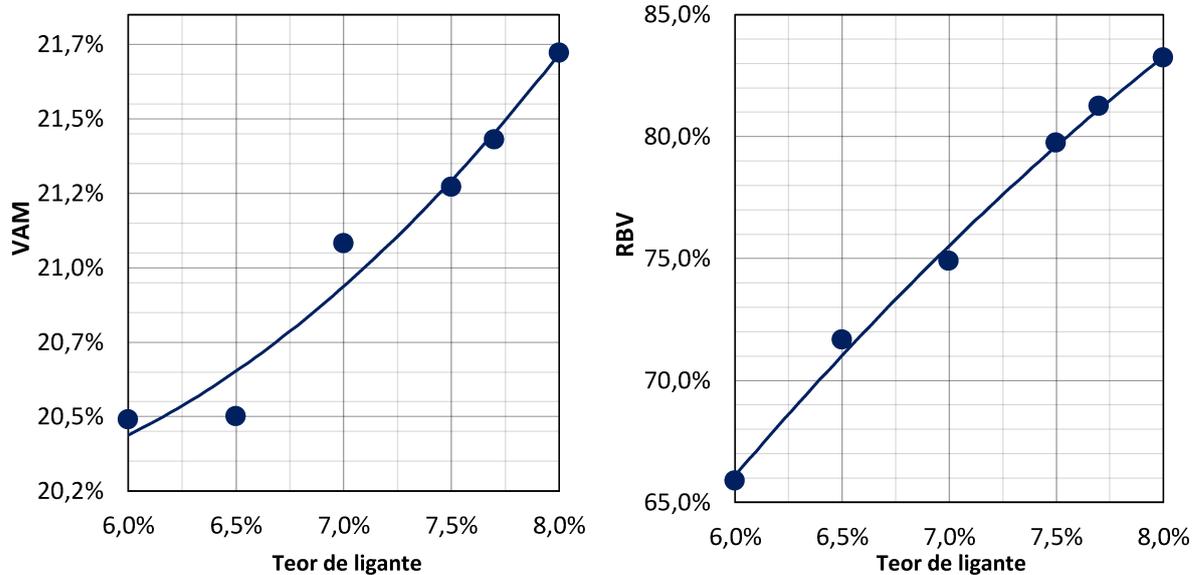
Portanto, de acordo com o Gráfico 8, o valor estimado para a estabilidade referentes ao teor de CAP de projeto foi 668,87 Kgf. O comportamento das densidades e dos parâmetros volumétricos (VAM e RBV) em função da variação do teor de ligante estão apresentados nos Gráficos 9 e 10 a seguir.

Gráfico 9 - Curvas das densidades aparentes e máximas teóricas.



Fonte: Autor (2017)

Gráfico 10 - Curvas dos parâmetros volumétricos VAM e RBV.



Fonte: Autor (2017)

#### 4.3.2.2 ECOFLEX B

De maneira análoga ao que feito com o CAP, moldaram-se seis corpos de prova para cada teor de 6%, 6,5% e 7% de asfalto-borracha (ECOFLEX B), sendo três destinados a análise dos parâmetros volumétricos e estabilidade/fluência, e os outros três para a resistência à tração. O teor de fibras de sisal para moldagem dos CP's com o ECOFLEX B foi de 0,4%, como definido no ensaio de escorrimento.

As Tabelas de 36 a 38 apresentam os resultados das densidades e parâmetros volumétricos avaliados para os três de ligante.

Tabela 36 - Resultados dos parâmetros volumétricos e densidades para 6% de ECOFLEX B.

	CP 1	CP 2	CP 3	Média
<b>Ms (g)</b>	1190,8	1189,3	1192,2	-
<b>Vcp (cm<sup>3</sup>)</b>	491,0	495,2	493,0	-
<b>Dap (g/cm<sup>3</sup>)</b>	2,425	2,402	2,418	<b>2,415</b>
<b>Vv (%)</b>	4,34%	5,27%	4,62%	<b>4,75%</b>
<b>VCB (%)</b>	14,06%	13,92%	14,02%	<b>14,00%</b>
<b>VAM (%)</b>	18,40%	19,20%	18,64%	<b>18,74%</b>
<b>RBV (%)</b>	76,40%	72,52%	75,21%	<b>74,71%</b>
<b>DMT =</b>	<b>2,535 (g/cm<sup>3</sup>)</b>			

Fonte: Autor (2017)

Tabela 37 - Resultados dos parâmetros volumétricos e densidades para 6,5% de ECOFLEX B.

	<b>CP 1</b>	<b>CP 2</b>	<b>CP 3</b>	<b>Média</b>
<b>Ms (g)</b>	1177,4	1188,1	1186,6	-
<b>Vcp (cm<sup>3</sup>)</b>	491,0	493,0	486,8	-
<b>Dap (g/cm<sup>3</sup>)</b>	2,398	2,410	2,438	<b>2,415</b>
<b>Vv (%)</b>	4,65%	4,18%	3,09%	<b>3,97%</b>
<b>VCB (%)</b>	15,06%	15,13%	15,31%	<b>15,17%</b>
<b>VAM (%)</b>	19,71%	19,31%	18,40%	<b>19,14%</b>
<b>RBV (%)</b>	76,40%	78,36%	83,20%	<b>79,32%</b>
<b>DMT = 2,516 (g/cm<sup>3</sup>)</b>				

Fonte: Autor (2017)

Tabela 38 - Resultados dos parâmetros volumétricos e densidades para 7% de ECOFLEX B.

	<b>CP 1</b>	<b>CP 2</b>	<b>CP 3</b>	<b>Média</b>
<b>Ms (g)</b>	1201,1	1169,2	1162,1	-
<b>Vcp (cm<sup>3</sup>)</b>	497,0	491,9	482,3	-
<b>Dap (g/cm<sup>3</sup>)</b>	2,417	2,377	2,409	<b>2,401</b>
<b>Vv (%)</b>	3,16%	4,73%	3,44%	<b>3,77%</b>
<b>VCB (%)</b>	16,34%	16,07%	16,29%	<b>16,24%</b>
<b>VAM (%)</b>	19,50%	20,80%	19,73%	<b>20,01%</b>
<b>RBV (%)</b>	83,81%	77,28%	82,57%	<b>81,22%</b>
<b>DMT = 2,497 (g/cm<sup>3</sup>)</b>				

Fonte: Autor (2017)

Quanto as propriedades mecânicas da mistura analisada com o ECOFLEX B, os valores obtidos para a estabilidade demonstram-se consideravelmente aquém do esperado, visto que, o SMA com asfalto-borracha, como será visto adiante, segundo Pazzinato (2014) e Leal (2013) apresentam altos valores para a estabilidade. Isso se atribui aos possíveis problemas identificados com a equipamento utilizado para a execução do ensaio, como fora comentado anteriormente. Os resultados para as propriedades mecânicas estão determinados no Apêndice G e resumidos na Tabela 39.

Tabela 39 - Resultados da estabilidade, fluência e resistência à tração para o ECOFLEX B.

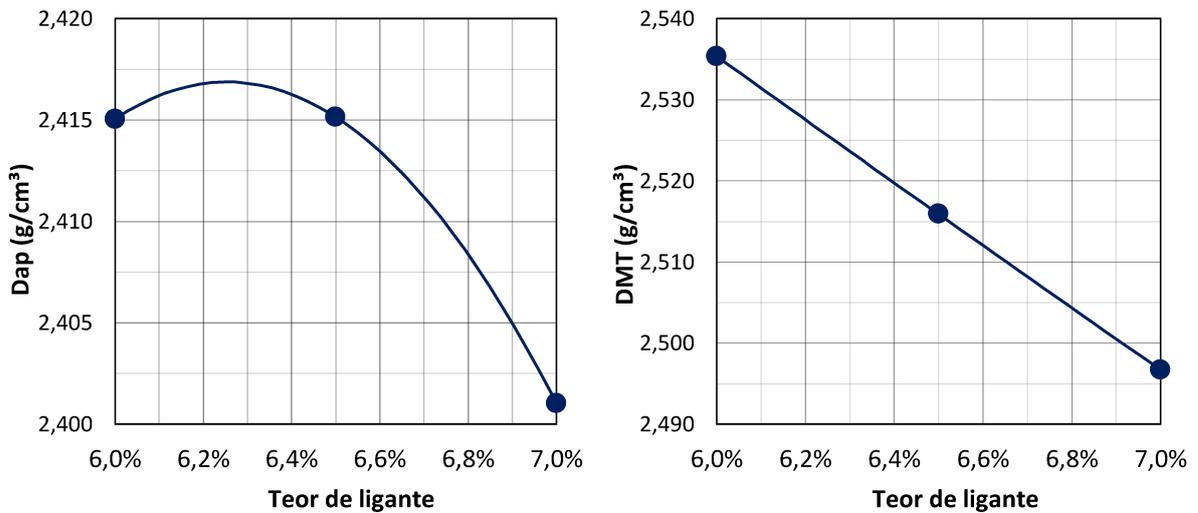
<b>Descrição</b>	<b>Teores de ECOFLEX B</b>		
	<b>6%</b>	<b>6,5%</b>	<b>7%</b>
<b>ES (Kgf)</b>	590,76	301,08	439,66

<b>Fluência (mm)</b>	20,25	16,50	15,49
<b>RT (Mpa)</b>	1,00	1,01	1,07

Fonte: Autor (2017)

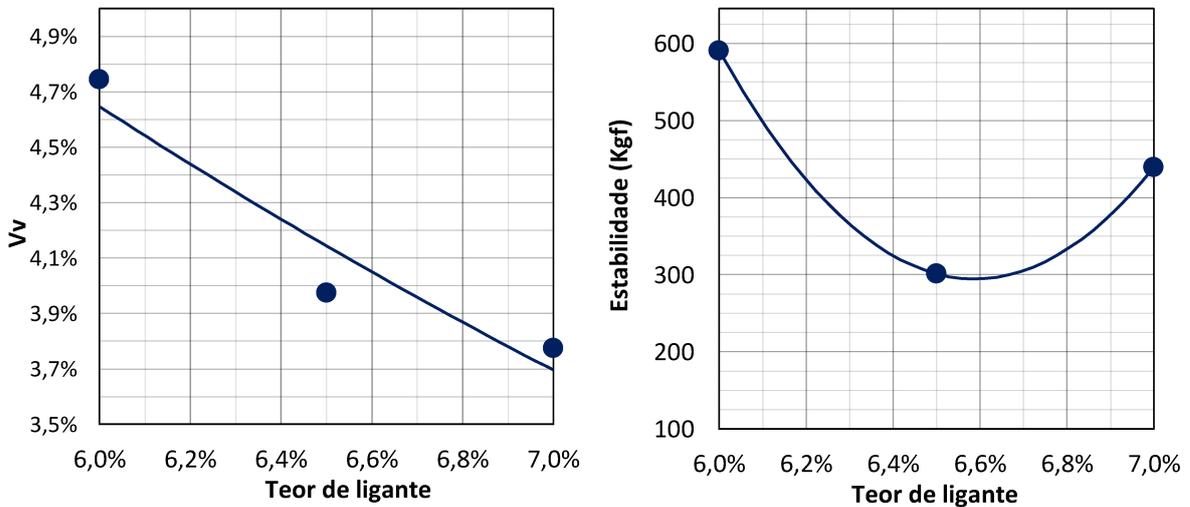
De acordo com os resultados dos parâmetros volumétricos, definiu-se o teor de ligante de projeto para 6,5% de ECOFLEX B, visto que este teor atingiu um volume de vazios imediatamente próximo ao especificado para o SMA, que é de 4% conforme a Tabela 1. O comportamento dos parâmetros volumétricos, bem como as densidades e a estabilidade em função do teor de ligante estão apresentadas nos Gráficos de 11 a 13 a seguir.

Gráfico 11 - Curvas das densidades aparentes e máximas teóricas para o ECOFLEX B.



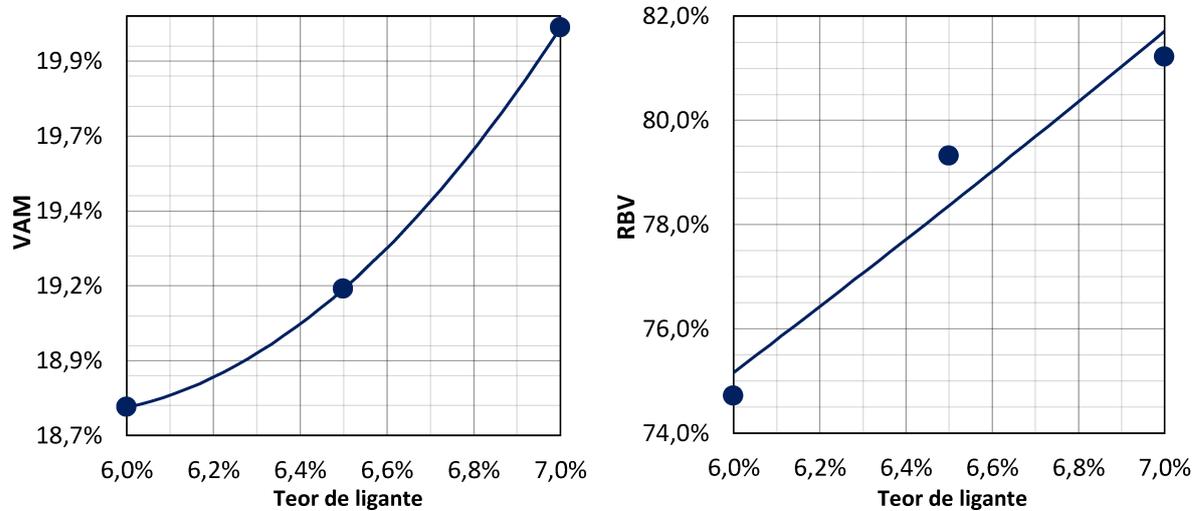
Fonte: Autor (2017)

Gráfico 12 - Curvas do volume de vazios e estabilidade Marshall para o ECOFLEX B.



Fonte: Autor (2017)

Gráfico 13 - Curvas dos parâmetros volumétricos VAM e RBV para o ECOFLEX B.

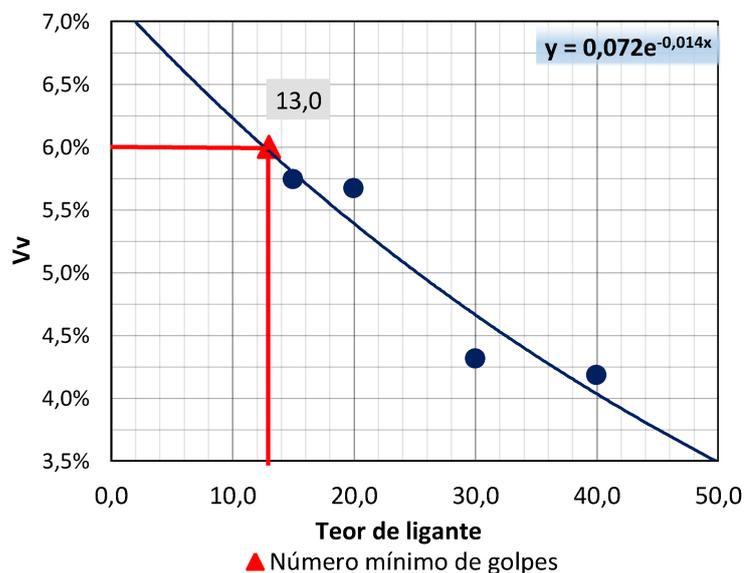


Fonte: Autor (2017)

#### 4.3.3 Ensaio Lottman

O ensaio Lottman foi realizado somente para o CAP 50/70 devido a quantidade insuficiente de ECOFLEX B para a execução desse ensaio. Inicialmente determinou-se o número de golpes mínimo para que se alcançasse o volume de vazios entre 6% a 8%. Assim, conforme o Gráfico 14, definiu-se 13 golpes como número de golpes mínimo.

Gráfico 14 - Determinação do número de golpes para o ensaio Lottman.



Fonte: Autor (2017)

Depois de definido os números de golpes, foram moldados os seis corpos de prova para a determinação da resistência à tração após o condicionamento e sem o condicionamento, conforme descrito no item 3.3.3.5. Os resultados estão apresentados na Tabela 40.

Tabela 40 - Resultados do ensaio Lottman.

	<b>CP 1</b>	<b>CP 2</b>	<b>CP 3</b>	<b>CP 4</b>	<b>CP 5</b>	<b>CP 6</b>
<b>H (cm):</b>	7,19	7,18	7,30	7,28	7,20	7,35
<b>D (cm):</b>	10,24	10,39	10,29	10,16	10,15	10,10
<b>Pi (g)</b>	1194,1	1189,9	1192,6	-	-	-
<b>Vcp (cm<sup>3</sup>)</b>	516,6	514,9	515,8	-	-	-
<b>Dap (g/cm<sup>3</sup>)</b>	2,311	2,311	2,312	-	-	-
<b>Vv (%)</b>	6,04%	6,06%	6,01%	-	-	-
<b>Pf (g)</b>	1236,0	1230,2	1231,2	-	-	-
<b>S (%)</b>	58,13%	55,91%	53,86%	-	-	-
<b>F (N)</b>	7908,4	7513,0	6722,2	9490,1	9490,1	8995,8
<b>RT (Mpa)</b>	-	-	-	0,82	0,83	0,77
<b>Rtu (Mpa)</b>	0,68	0,64	0,57	-	-	-
<b>RRT = 78%</b>						

Fonte: Autor (2017)

De acordo com a especificação da AASHTO MP8-01 apresentado na Tabela 1, o resultado obtido para a resistência à tração por umidade induzida de 78% atende ao mínimo exigido de 70%.

#### 4.3.4 Discussões dos resultados e comparação com outros estudos similares

Após de realizadas as misturas e obtidos os resultados dos parâmetros volumétricos e mecânicos, definiu-se um traço da mistura para o CAP 50/70 e o ECOFLEX B, conforme a Tabela 41.

Tabela 41 - Traços das misturas.

<b>Ligante</b>	<b>Teor de projeto</b>	<b>% ideal de fibras</b>	<b>Traço de agregados</b>			
			<b>Brita 1</b>	<b>Brita 0</b>	<b>Pó de brita</b>	<b>Fíler</b>
<b>CAP 50/70</b>	7,7%	1,5%	54%	23%	14%	9%
<b>ECOFLEX B</b>	6,5%	0,4%	54%	23%	14%	9%

Fonte: Autor (2017)

A Tabela 42 resume os resultados das misturas estudadas conforme o traço e teores de ligante de projeto, tanto para o CAP 50/70 quanto para o ECOFLEX B. Fez-se a análise dos resultados com base na especificação da AASHTO MP8-01 apresentada na Tabela 1. Quanto aos resultados da estabilidade Marshall para o ECOFLEX B, definiu-se que os valores obtidos são inconclusivos, visto que os resultados se demonstraram incomuns devido a possíveis problemas com o equipamento.

Tabela 42 - Análise dos resultados do SMA estudado.

<b>Propriedades</b>	<b>AASHTO MP8-01</b>	<b>CAP 50/70</b>	<b>ECOFLEX B</b>
Teor de asfalto (%)	6,0 mín	7,7	6,5
Volume de vazios (%)	4,0	4,02	3,97
VAM (%)	17,0 mín	21,38	19,14
RT (Mpa)	0,6	0,63	1,01
RRT (%)	70 mín	78	-
Estabilidade (Kgf)	632 mín	668,87	Inconclusivo
Escorrimento (%)	0,30 máx	0,19	0,13

Fonte: Autor (2017)

A partir dos valores obtidos da mistura estudada com o CAP e com o asfalto-borracha, fez-se algumas comparações com outros estudos similares do SMA que estão apresentados nas Tabelas 43 e 44. Dentre estes, estão:

- SMA com fibras de cana-de-açúcar com CAP 50/70 estudada por Ericeira (2017);
- SMA com fibras de babaçu de Sousa (2016), cujo ligante utilizado foi o CAP 50/70;
- SMA com fibras de coco verde e com celulose segundo Vale (2007), ambas misturadas com o CAP 50/70;
- O SMA estudado por Pazzinato (2014) com asfalto modificado por polímero mais celulose (AMP) e asfalto-borracha (AMB);
- SMA com asfalto-borracha e fibras de cana-de-açúcar de Leal (2013).

Tabela 43 – Comparação de resultados 1: SMA com diferentes agentes estabilizadores.

<b>Propriedades</b>	<b>CAP + sisal</b>	<b>ECOFLEX B + sisal</b>	<b>Cana-de-açúcar</b>	<b>Babaçu</b>	<b>Coco verde</b>	<b>Celulose</b>
Teor de ligante (%)	7,7	6,5	6,0	6,0	6,3	6,0
Volume de vazios (%)	4,02	3,97	4,03	5,14	4,40	3,80
VAM (%)	21,38	19,14	17,90	18,39	18,40	17,50
RT (Mpa)	0,63	1,01	0,84	0,58	0,76	0,67
RRT (%)	78	-	Inconclusivo	-	91	71
Estabilidade (Kgf)	668,9	Inconclusivo	667,56	720,60	-	-
Fluência (mm)	9,44	16,50	4,35	-	-	-
Teor de fibras	1,50	0,40	1,50	4,86	0,50	0,50
Escorrimento (%)	0,19	0,13	0,02	0,10	0,10	0,01

Fonte: Autor (2017)

Tabela 44 – Comparação de resultados 2: SMA com diferentes agentes estabilizadores.

<b>Propriedades</b>	<b>CAP + sisal</b>	<b>ECOFLEX B + sisal</b>	<b>AMP 60/85 E + celulose</b>	<b>AMB AB8</b>	<b>AMB + cana-de-açúcar</b>
Teor de ligante (%)	7,7	6,5	6,1	6,3	6,7
Volume de vazios (%)	4,02	3,97	4,00	4,00	4,00
VAM (%)	21,38	19,14	19,50	20,1	19,40
RT (Mpa)	0,63	1,01	0,83	0,79	1,31
RRT (%)	78	-	-	-	97,2
Estabilidade (Kgf)	668,87	Inconclusivo	1014,4	1091,30	1136,39
Fluência (mm)	9,44	16,50	3,90	3,80	-
Teor de fibras	1,50	0,40	-	-	0,30
Escorrimento (%)	0,19	0,13	0,21	0,19	0,02

Fonte: Autor (2017)

Comparando-se com os resultados dos outros estudos apresentados, a mistura com CAP e fibra de sisal teve um alto valor para o teor de ligante de projeto. Deste modo, percebe-se que a resistência à tração para esta mistura alcançou um valor satisfatório de acordo com o mínimo estabelecido. Contudo, notou-se que o aumento do teor de ligante diminuiu, consideravelmente, a resistência à tração, conforme os resultados apresentados na Tabela 29. Quanto a fluência, o SMA com CAP e fibra de sisal também apresentou um valor médio que destoa dos resultados dos demais, o que também pode ser atribuído ao alto teor de ligante de projeto, provocando uma deformação maior dos corpos de prova.

Além disso, percebe-se ainda que a estabilidade teve um valor próximo às misturas com fibras de cana de açúcar e com babaçu. Não obstante, estas três, se comparadas as demais misturas, obtiveram estabilidades inferiores. Quanto ao teor de fibras utilizado nestas, verifica-se que os valores foram superiores a recomendação e aos demais SMA's. Isso se atribui ao fato de que os SMA's com estabilidades elevadas e teores de fibra dentro do recomendado foram misturados com asfaltos modificados por polímero ou borracha. O uso destes asfaltos especiais permite uma redução do escorrimento do ligante e, conseqüentemente, dos teores de fibra na mistura.

Em relação ao volume de vazios, vazios do agregado mineral (VAM) e a resistência à tração por umidade induzida (RRT), os valores da mistura com CAP e fibra de sisal foram satisfatórios, assim como os demais SMA's apresentados.

Para a mistura com o ECOFLEX B e fibra de sisal, o teor de ligante de projeto obtido foi próximo aos demais e atendeu ao mínimo especificado. O volume de vazios determinado foi imediatamente próximo ao valor exigido de 4% e, os vazios do agregado mineral também atenderam à especificação. O teor de fibras ideal utilizado atendeu a recomendação e apresentou um escorrimento adequado, o que é justificado pelo uso do asfalto-borracha. A estabilidade foi inconclusiva, conforme já fora discutido, o que pode também ter corroborado ao alto valor da fluência apresentado, o qual demonstra-se superior aos demais SMA's. Quanto a resistência à tração (RT), a mistura com o ECOFLEX B e fibra de sisal teve um dos maiores resultados dentre os SMA's, o que pode ser justificado pelo uso do asfalto-borracha e a própria características da fibra de sisal.

## 5 CONCLUSÃO

A pesquisa em questão teve como enfoque propor a instituição de fibras de sisal em misturas asfálticas tipo SMA. Para tanto, as análises e verificações das propriedades da mistura foram embasadas nas especificações da AASHTO MP8-01.

O desenvolvimento do estudo partiu da caracterização dos agregados que seriam utilizados na mistura. Diferente dos outros tipos de revestimentos asfálticos, o SMA possui características próprias quanto a sua composição granulométrica, como uma alta porcentagem de agregados graúdos e a presença de finos que compõem o mástique asfáltico, requerendo assim, um preciso controle tecnológico dos agregados.

Em relação aos agregados graúdos, dos ensaios realizados para a caracterização destes, todos atenderam as especificações, com exceção da adesividade. Tanto a brita 1 quanto a brita 0 ensaiadas apresentaram uma adesividade insatisfatória. Quanto aos agregados miúdos e material de enchimento, destaca-se o ensaio de angularidade do agregado fino (FAA), considerado fundamental para o SMA. Por mais que as recomendações sugiram o uso de agregados 100% britados, ainda se ensaiou amostras de areia natural com vistas à incorporação desta na mistura. Contudo, todas as amostras analisadas não atenderam o mínimo especificado, de modo que se decidiu utilizar somente o pó de brita (areia britada), visto que foi o único a apresentar resultados satisfatórios. Todos os demais ensaios realizados para o agregado miúdo atenderam as especificações.

Os ligantes utilizados nas misturas foram o CAP 50/70 e o asfalto-borracha (ECOFLEX B). Apenas o primeiro foi ensaiado no LSP, visto que o segundo foi ensaiado pelo fabricante e os resultados fornecidos. Quanto aos ensaios realizados com o cimento asfáltico, os resultados obtidos ratificaram a sua classificação como CAP 50/70 e, as leituras feitas para a viscosidade, bem como a temperatura de ponto de amolecimento, demonstraram condizentes com as especificações.

Para a fibra de sisal proposta a ser utilizada na mistura, o principal parâmetro de análise foi o ensaio de escorrimento, segundo o método de Schellenberg. Inicialmente tentou-se triturar a fibra manualmente, contudo, este tratamento demonstrou ser inviável, visto que era lento, não se obtinha uma amostra homogênea e os resultados para o escorrimento realizado apresentaram uma

grande exsudação do ligante (CAP 50/70). Assim, buscou-se utilizar um triturador que pudesse fornecer uma grande quantidade de material e que proporcionasse uma amostra homogênea. Assim, foi feito o ensaio de escorrimento do ligante para o CAP 50/70 e para o ECOFLEX B, apresentando resultados satisfatórios para os teores ideais de fibra de 1,5% e 0,4%, respectivamente.

A moldagem dos corpos de prova foi feita conforme a dosagem Marshall. Para o CAP 50/70, inicialmente moldaram-se os CP's para os teores de 6%, 6,5% e 7%, contudo, os vazios com ar encontrados foram elevados. Então, moldaram-se mais CP's para os teores de 7,5% e 8% de ligante, permitindo assim determinar o teor de projeto para 4% de volume de vazios, que foi de 7,7% de CAP. Para o ECOFLEX B, devido à pouca quantidade de material disponível para a realização da pesquisa, moldaram-se os CP's apenas para os teores de 6%, 6,5% e 7%, obtendo-se um volume de vazios bem próximo a 4% para 6,5% de asfalto-borracha, sendo este teor definido como o de projeto.

Os parâmetros volumétricos e as propriedades mecânicas avaliadas para a mistura com CAP e fibra de sisal demonstraram-se satisfatórios. Apesar de o teor de ligante de projeto ter sido superior aos demais estudos comparados, satisfaz ao limite mínimo exigido. Destaca-se a resistência à tração que, com o aumento do teor de ligante, diminuiu consideravelmente para o teor de CAP de projeto, mais ainda sim atendeu ao mínimo especificado. Quanto ao ECOFLEX B, o teor de ligante de projeto apresentou um valor próximo aos demais comparados. Além disso, no que tange à resistência à tração, a mistura de ECOFLEX B e fibra de sisal, dentre os estudos comparados, obteve um dos maiores valores. Ademais, todos os outros parâmetros avaliados das duas misturas propostas atendem às especificações da AASHTO MP8-01.

Portanto, após de apresentados os resultados e avaliados o comportamento das misturas asfálticas em questão, tanto com o CAP 50/70 quanto com o ECOFLEX B, conclui-se que a fibra de sisal pode ser empregada em revestimentos asfálticos tipo SMA, demonstrando ser um eficaz agente estabilizador.

## **5.1 Recomendações para pesquisas futuras**

A partir dos resultados obtidos e após uma análise macro do desempenho das misturas asfálticas propostas, são feitas a seguir algumas sugestões para estudos futuros:

- A primeira sugestão para futuros trabalhos é a repetição dos ensaios de estabilidade Marshall e fluência, visto que em um determinado momento no decorrer dos ensaios, o equipamento passou a apresentar valores incomuns, o que resultou em baixas estabilidades para o ECOFLEX B;
- Para as próximas misturas com fibra de sisal, seria interessante avaliar o comportamento da mistura a medida que se aumenta o teor de fibras, analisando-se os parâmetros volumétricos e as propriedades mecânicas para esta variação;
- Quanto aos agregados graúdos, sugere-se a realização do ensaio de sanidade com vistas a avaliação da durabilidade do agregado pelo emprego de soluções de sulfato de sódio ou magnésio. O ensaio é regido pela norma DNER-ME 089/54, sendo um dos ensaios de agregados graúdos especificados para o SMA e que não foi possível executar nesta pesquisa;
- Para estudos futuros, é importante que seja determinado o módulo de resiliência, ensaio este que consiste em aplicar uma carga repetidamente no plano diametral vertical de um corpo de prova;
- Em relação ao desempenho do SMA com fibra de sisal, em estudos vindouros poderiam ser avaliadas a vida de fadiga e a sensibilidade da mistura quanto a resistência à deformação permanente. Além disso, ainda poderia ser realizado o ensaio de desgaste cântabro, o qual avalia a capacidade de o revestimento suportar o arrancamento progressivo de agregados da capa de rolamento devido ao atrito pneu-pavimento;
- Por fim, sugere-se a utilização de algum asfalto modificado por polímero em substituição ao CAP 50/70, visto que os asfaltos modificados em geral apresentam melhores resultados para o escorrimento do ligante, reduzindo o teor de fibras necessário na mistura.

## 6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C 1252**: Standard Test Methods for Uncompacted Void Content of Fine Aggregate (as Influenced by Particle Shape, Surface Texture, and Grading). Pensilvânia. Estados Unidos da América, 2003.

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. **AASHTO T 203**: Standard Method of Test for Resistance of Compacted Asphalt Mixtures to Moisture-Induced Damage. Estados Unidos da América, 2014.

ANDRADE. Mário Henrique Furtado. **Noções de projeto de dimensionamento de pavimentos**. Universidade Federal do Paraná, Paraná, 2005.

\_\_\_\_\_. **ABNT NBR 14950**: Materiais betuminosos - Determinação da viscosidade Saybolt-Furol. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

\_\_\_\_\_. **ABNT NBR 6954**: Agregado graúdo - Determinação do índice de forma pelo método do paquímetro - Método de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 1989.

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

BARRETO JÚNIOR, et al. **Avaliação do Comportamento do Ligante Asfalto-Borracha e de Fibras Naturais em Misturas Asfálticas Descontínuas**. Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado da Bahia - FAPESB. Bahia.

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

BLAZEJOWSKI, Krzysztof. **Stone Matrix Asphalt**: Theory and Practice. Flórida: Taylor & Francis Group, 2011.

CARVALHO. Ricardo Fernandes. **Compósitos de fibra de sisal para uso em reforço estrutural de madeira**. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de materiais) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE – CNT, Anuário do Transporte. Disponível em: <<http://anuariodotransporte.cnt.org.br/2017/Apresentacao>>. Acessado em: 24 jun. de 2017.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE – CNT, Boletim Estatístico. Disponível em: <<http://www.cnt.org.br/Boletim/boletim-estatistico-cnt>>. Acessado em: 25 jun. de 2017.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE – CNT, Transporte rodoviário – “Porque os pavimentos das rodovias do Brasil não duram? ”. Disponível em: <<http://www.cnt.org.br/Estudo/transporte-rodoviario-pavimento>>. Acessado em: 21 out. de 2017.

DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM DO PARANÁ. **DER-PR. Revestimentos Asfálticos SMA.** Paraná, 2008.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. Diretoria de Planejamento e Pesquisa. Coordenação Geral de Estudos e Pesquisa. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. **Manual de pavimentação.** 3. ed. Rio de Janeiro, 2006a.

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

\_\_\_\_\_. **DNER-ME 053:** Misturas betuminosas – porcentagem de betume. Rio de Janeiro, DNER, 1994.

\_\_\_\_\_. **DNER-ME 035:** Peneiras de malhas quadradas para análise granulométrica de solos. Rio de Janeiro, DNER, 1995.

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

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

\_\_\_\_\_. **DNER-ME 078:** Adesividade a ligante betuminoso. Rio de Janeiro, DNER, 1994.

\_\_\_\_\_. **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 084:** Agregado miúdo – determinação da densidade real. Rio de Janeiro, DNER, 1995.

\_\_\_\_\_. **DNER-ME 085:** Material finamente pulverizado – determinação da densidade real. Rio de Janeiro, DNER, 1994.

\_\_\_\_\_. **DNER-ME 089:** Agregados – Avaliação da durabilidade pelo emprego de soluções de sulfato de sódio ou de magnésio. Rio de Janeiro, DNER, 1994.

\_\_\_\_\_. **DNER-ME 093:** Solos – determinação da massa específica real. Rio de Janeiro, DNER, 1994.

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

\_\_\_\_\_. **DNER-PRO 199:** Redução da amostra de campo de agregados para ensaio de laboratório. Rio de Janeiro, DNER, 1996.

\_\_\_\_\_. **DNIT-EM 095:** Cimentos asfálticos de petróleo – Especificação de material. 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 à tração por compressão diametral – Método de ensaio. Rio de Janeiro: DNIT, 2010.

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

EAPA – European Asphalt Paving Association (1998). Heavy Duty Surfaces: The Arguments for SMA. Holanda.

ELIAS. Bruno Henrique Santos. **Estudo sobre a utilização de asfalto borracha em revestimento tipo CAUQ no Maranhão.** Monografia (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Estadual do Maranhão, São Luís, 2016.

ERICEIRA. Brena Luísa Ribeiro. **Aplicabilidade de fibras de cana-de-açúcar em misturas asfálticas tipo SMA.** Monografia (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Estadual do Maranhão, São Luís, 2017.

E-CIVIL. Pavimentos semirrígido. Disponível em: <<http://www.ecivilnet.com/dicionario/o-que-e-pavimento-semi-rigido.html>>. Acessado em: 27 out. de 2017.

GOUVEIA, Lilian Taís. **Avaliação do ensaio de angularidade do agregado fino (FAA) da especificação SUPERPAVE.** Tese de mestrado – Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, 2002.

JÚNIOR. Elci Pessoa. **Manual de obras rodoviárias e pavimentação urbana: execução e fiscalização.** São Paulo: Pini, 2014.

LEAL, Cláudio Luís Dias. **Aproveitamento do bagaço de cana-de-açúcar em misturas asfálticas.** 219f Dissertação (Doutorado) – Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2013.

LEOCÁDIO, G. A. S. **Reforço de solo laterítico com fibras de sisal de distribuição aleatória, tratadas superficialmente com eps reciclado.** Dissertação de mestrado [Mestrado em Engenharia de materiais] – Rede Temática em Engenharia de Materiais UFOP/CTEC/UEMG, Ouro Preto, 2005.

MARTIN, Adriana; MATTOSO, Maria; SILVA, Odilon. **Caracterização química e estrutural da fibra de sisal de variedade Agave Sisalana.** Universidade federal de São Carlos. São Paulo, 2009.

MIRANDA, Henrique et al. **Análise comparativa de métodos de ensaio para avaliação do escoamento, em misturas betuminosas do tipo Stone Mastic Asphalt, segundo a norma europeia EN 12697-18.** Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Área Departamental de Engenharia Civil, Lisboa, Portugal, 2013

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.

MYERS, M. Nancy. **Stone Matrix Asphalt: The Washington Experience.** Tese de mestrado em Engenharia Civil – University of Washington, Washington, 2007.

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.

PAZINATTO, João Antônio M. **Estudo comparativo de misturas asfálticas tipo SMA efetuadas com asfalto modificado por polímero e asfalto modificado por borracha.** 2014. 43 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Campo Mourão, 2014.

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.

REIS, Rafael Marçal Martins de. **Revestimento asfáltico tipo SMA para alto desempenho em vias de tráfego pesado.** Dissertação (Mestrado em engenharia) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.

SENÇO, Wlastermiler de. 1929. **Manual de técnicas de pavimentação: volume 1** /Wlastermiler de Senço. 2. ed. ampl. São Paulo: Pini, 2007.

SOUSA, Samuel Costa de. **Estudo de misturas asfálticas tipo SMA (Stone Matrix Asphalt) com uso de fibras de babaçu.** Monografia (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Estadual do Maranhão, São Luís, 2016.

VALE, Aline Colares. **Estudo laboratorial da viabilidade do uso de fibras de coco em misturas asfálticas do tipo SMA.** Tese de Mestrado – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2007.

VICENTINI. Daniane Franciesca. **Anotações de aula – Pavimentação.**  
Universidade Federal do Paraná, Paraná, 2015.

## APÊNDICE A – ÍNDICE DE FORMA

Tabela 45 – Índice de forma.

Nº	a	b	c	b/a	c/b	Nº	a	b	c	b/a	c/b
1	28,07	11,87	9,19	0,423	0,774	51	27,81	20,14	12,13	0,724	0,602
2	19,82	12,79	7,08	0,645	0,554	52	30,73	13,03	9,82	0,424	0,754
3	25,87	11,18	7,40	0,432	0,662	53	28,76	10,85	8,14	0,377	0,750
4	30,03	12,62	7,48	0,420	0,593	54	27,86	20,12	12,09	0,722	0,601
5	35,53	12,38	9,74	0,348	0,787	55	23,88	18,83	10,48	0,789	0,557
6	24,82	11,78	7,27	0,475	0,617	56	35,85	14,06	12,06	0,392	0,858
7	24,91	14,83	8,53	0,595	0,575	57	24,84	16,80	7,97	0,676	0,474
8	20,53	12,23	9,84	0,596	0,805	58	31,06	18,35	8,86	0,591	0,483
9	23,84	11,74	4,58	0,492	0,390	59	23,99	18,05	7,59	0,752	0,420
10	19,84	13,13	10,71	0,662	0,816	60	21,62	17,12	14,94	0,792	0,873
11	33,88	12,70	5,70	0,375	0,449	61	34,47	16,33	6,39	0,474	0,391
12	28,38	13,71	7,93	0,483	0,578	62	24,57	19,39	7,15	0,789	0,369
13	22,84	15,30	8,28	0,670	0,541	63	24,44	17,37	11,72	0,711	0,675
14	24,51	12,75	9,00	0,520	0,706	64	25,56	19,40	13,61	0,759	0,702
15	24,67	13,84	4,05	0,561	0,293	65	24,44	17,43	12,89	0,713	0,740
16	20,70	15,16	11,12	0,732	0,734	66	26,62	12,10	10,63	0,455	0,879
17	18,30	16,16	6,69	0,883	0,414	67	33,17	19,89	13,51	0,600	0,679
18	18,80	12,92	9,73	0,687	0,753	68	24,37	19,09	11,31	0,783	0,592
19	24,72	13,32	7,48	0,539	0,562	69	23,30	16,18	13,34	0,694	0,824
20	29,33	12,75	7,08	0,435	0,555	70	28,55	12,98	8,62	0,455	0,664
21	13,51	11,89	11,49	0,880	0,966	71	27,76	19,13	13,51	0,689	0,706
22	29,86	10,60	8,56	0,355	0,808	72	21,58	15,86	10,99	0,735	0,693
23	20,55	9,18	8,27	0,447	0,901	73	22,79	19,12	8,09	0,839	0,423
24	21,92	16,34	5,89	0,745	0,360	74	20,29	17,27	12,17	0,851	0,705
25	23,20	13,43	8,55	0,579	0,637	75	29,16	17,70	13,20	0,607	0,746
26	18,27	13,26	6,43	0,726	0,485	76	25,60	19,32	11,19	0,755	0,579
27	22,60	14,10	8,99	0,624	0,638	77	20,02	19,37	14,05	0,968	0,725
28	19,90	12,85	9,47	0,646	0,737	78	25,42	18,15	12,02	0,714	0,662
29	22,78	10,53	6,24	0,462	0,593	79	21,68	18,57	12,02	0,857	0,647
30	25,31	13,77	8,56	0,544	0,622	80	21,28	17,08	13,35	0,803	0,782
31	18,31	13,91	10,82	0,760	0,778	81	23,71	18,69	16,66	0,788	0,891
32	17,24	15,17	8,15	0,880	0,537	82	20,11	13,76	12,06	0,684	0,876
33	20,04	13,09	7,46	0,653	0,570	83	27,14	15,09	9,83	0,556	0,651
34	27,12	12,69	5,78	0,468	0,455	84	23,67	15,55	13,68	0,657	0,880
35	21,71	14,37	5,44	0,662	0,379	85	22,22	17,05	8,38	0,767	0,491
36	16,34	11,04	9,55	0,676	0,865	86	27,47	17,91	10,54	0,652	0,588
37	23,00	13,48	6,05	0,586	0,449	87	24,17	17,88	5,98	0,740	0,334
38	18,64	10,50	8,07	0,563	0,769	88	27,51	17,92	14,66	0,651	0,818
39	24,49	14,85	4,35	0,606	0,293	89	27,38	14,03	9,34	0,512	0,666
40	23,72	14,51	8,71	0,612	0,600	90	24,61	15,30	7,59	0,622	0,496
41	20,62	12,09	9,04	0,586	0,748	91	22,02	19,14	13,01	0,869	0,680
42	20,52	11,51	8,89	0,561	0,772	92	23,22	19,85	10,59	0,855	0,534
43	19,68	14,15	8,48	0,719	0,599	93	25,41	20,62	7,20	0,811	0,349
44	19,14	12,74	8,08	0,666	0,634	94	26,04	17,87	11,96	0,686	0,669
45	20,23	13,93	8,72	0,689	0,626	95	27,07	15,68	10,71	0,579	0,683
46	23,01	9,66	7,60	0,420	0,787	96	20,71	18,72	7,00	0,904	0,374
47	19,82	10,70	9,42	0,540	0,880	97	22,18	21,22	15,27	0,957	0,720
48	28,91	21,29	7,59	0,736	0,357	98	20,55	17,19	11,64	0,836	0,677
49	29,35	17,64	5,26	0,601	0,298	99	27,90	15,73	6,13	0,564	0,390
50	22,33	19,30	12,39	0,864	0,642	100	18,05	14,60	11,50	0,809	0,788

Tabela 45 – Índice de forma (continuação)

Nº	a	b	c	b/a	c/b	Nº	a	b	c	b/a	c/b
101	18,51	14,50	12,20	0,783	0,841	151	25,19	19,28	11,38	0,765	0,590
102	19,66	17,83	11,64	0,907	0,653	152	28,37	15,72	9,01	0,554	0,573
103	26,65	16,72	12,53	0,627	0,749	153	19,00	13,05	9,59	0,687	0,735
104	20,52	16,09	13,15	0,784	0,817	154	14,76	13,38	12,64	0,907	0,945
105	19,44	15,12	8,44	0,778	0,558	155	21,12	14,63	11,37	0,693	0,777
106	17,20	11,55	11,10	0,672	0,961	156	23,06	15,71	9,96	0,681	0,634
107	21,07	16,43	13,59	0,780	0,827	157	20,76	16,05	5,60	0,773	0,349
108	23,76	16,73	9,32	0,704	0,557	158	16,91	16,54	7,39	0,978	0,447
109	25,36	15,64	8,44	0,617	0,540	159	24,48	15,78	8,99	0,645	0,570
110	22,29	15,05	14,82	0,675	0,985	160	18,69	16,83	11,49	0,900	0,683
111	19,46	18,73	12,50	0,962	0,667	161	18,04	14,68	10,05	0,814	0,685
112	18,44	14,56	9,56	0,790	0,657	162	19,67	17,00	13,07	0,864	0,769
113	25,33	18,21	13,58	0,719	0,746	163	22,00	14,80	6,12	0,673	0,414
114	17,51	13,93	11,64	0,796	0,836	164	44,45	23,82	15,93	0,536	0,669
115	20,88	17,83	15,02	0,854	0,842	165	35,02	18,57	14,41	0,530	0,776
116	24,61	17,87	15,37	0,726	0,860	166	31,13	22,61	18,13	0,726	0,802
117	20,28	15,86	9,59	0,782	0,605	167	29,43	20,95	17,64	0,712	0,842
118	20,94	16,99	6,79	0,811	0,400	168	25,48	20,52	14,47	0,805	0,705
119	17,72	17,00	11,77	0,959	0,692	169	30,27	23,85	16,99	0,788	0,712
120	19,32	17,65	11,25	0,914	0,637	170	23,52	25,25	14,53	1,074	0,575
121	21,77	15,80	14,77	0,726	0,935	171	27,40	22,40	18,57	0,818	0,829
122	29,26	14,00	7,90	0,478	0,564	172	21,37	18,10	13,69	0,847	0,756
123	26,49	16,68	8,29	0,630	0,497	173	30,28	22,59	14,39	0,746	0,637
124	18,34	13,86	12,23	0,756	0,882	174	28,53	22,51	13,52	0,789	0,601
125	25,92	11,25	11,08	0,434	0,985	175	24,83	20,22	16,35	0,814	0,809
126	26,99	17,38	14,20	0,644	0,817	176	24,46	19,53	13,61	0,798	0,697
127	24,59	17,59	13,05	0,715	0,742	177	26,21	20,55	11,77	0,784	0,573
128	23,51	16,23	9,26	0,690	0,571	178	24,86	24,55	8,40	0,988	0,342
129	23,47	16,75	10,01	0,714	0,598	179	24,18	20,92	16,81	0,865	0,804
130	19,45	16,86	10,52	0,867	0,624	180	25,00	23,49	15,75	0,940	0,670
131	24,50	17,25	12,81	0,704	0,743	181	30,12	25,08	14,07	0,833	0,561
132	19,30	19,13	10,15	0,991	0,531	182	22,22	20,09	17,51	0,904	0,872
133	17,23	15,70	9,87	0,911	0,629	183	22,37	16,50	13,50	0,738	0,818
134	20,55	13,97	13,51	0,680	0,967	184	28,54	22,57	18,22	0,791	0,807
135	16,47	14,99	11,56	0,910	0,771	185	25,86	21,98	17,40	0,850	0,792
136	18,92	12,55	9,90	0,663	0,789	186	27,28	18,39	14,13	0,674	0,768
137	21,77	19,61	11,88	0,901	0,606	187	38,17	22,29	16,12	0,584	0,723
138	20,50	15,38	10,33	0,750	0,672	188	25,29	21,09	16,57	0,834	0,786
139	18,49	15,36	7,40	0,831	0,482	189	32,93	17,88	14,02	0,543	0,784
140	17,70	15,17	4,85	0,857	0,320	190	25,68	20,95	16,07	0,816	0,767
141	22,49	18,24	13,37	0,811	0,733	191	22,51	17,45	13,31	0,775	0,763
142	21,45	21,44	9,66	1,000	0,451	192	31,51	23,14	11,21	0,734	0,484
143	24,30	14,88	10,24	0,612	0,688	193	26,73	25,25	15,42	0,945	0,611
144	19,00	17,48	12,95	0,920	0,741	194	26,28	18,26	15,91	0,695	0,871
145	19,04	18,96	15,28	0,996	0,806	195	35,88	21,93	19,52	0,611	0,890
146	20,99	15,47	6,94	0,737	0,449	196	27,48	23,00	16,10	0,837	0,700
147	19,57	18,12	9,28	0,926	0,512	197	28,51	23,34	18,31	0,819	0,784
148	24,75	17,07	11,14	0,690	0,653	198	27,82	18,35	11,48	0,660	0,626
149	21,62	18,20	12,80	0,842	0,703	199	25,24	23,98	11,66	0,950	0,486
150	19,96	12,54	7,95	0,628	0,634	200	19,89	17,90	16,55	0,900	0,925

Média b/a = 0,712

Média c/b = 0,662

Fonte: Autor (2017)

## APÊNDICE B - ANGULARIDADE E DENSIDADE REAL

Tabela 46 – Angularidade pó de brita.

<b>Pó de brita</b>					
<b>V (cm<sup>3</sup>)</b>	<b>c (g)</b>	<b>W (g)</b>	<b>Dr (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>U' (%)</b>	<b>U (%)</b>
100,45	189,26	329,87	2,752	49,14	<b>49,40</b>
100,45	189,26	328,39	2,752	49,67	

Fonte: Autor (2017)

Tabela 47 – Angularidade areia 1.

<b>Areia 1</b>					
<b>V (cm<sup>3</sup>)</b>	<b>c (g)</b>	<b>W (g)</b>	<b>Dr (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>U' (%)</b>	<b>U (%)</b>
100,45	189,26	351,67	2,658	39,17	<b>39,12</b>
100,45	189,26	351,94	2,658	39,07	

Fonte: Autor (2017)

Tabela 48 - Angularidade areia 2.

<b>Areia 2</b>					
<b>V (cm<sup>3</sup>)</b>	<b>c (g)</b>	<b>W (g)</b>	<b>Dr (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>U' (%)</b>	<b>U (%)</b>
100,45	189,26	348,42	2,614	39,39	<b>39,27</b>
100,45	189,26	349,04	2,614	39,15	

Fonte: Autor (2017)

Tabela 49 – Angularidade areia 3.

<b>Areia 1</b>					
<b>V (cm<sup>3</sup>)</b>	<b>c (g)</b>	<b>W (g)</b>	<b>Dr (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>U' (%)</b>	<b>U (%)</b>
100,67	189,46	350,60	2,663	39,89	<b>39,83</b>
100,67	189,46	350,90	2,663	39,78	

Fonte: Autor (2017)

Tabela 50 – Densidade real do pó de brita.

<b>Pó de brita</b>					
<b>a (g)</b>	<b>b (g)</b>	<b>c (g)</b>	<b>d (g)</b>	<b>D'r (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Dr (g/cm<sup>3</sup>)</b>
139,83	637,85	927,89	610,98	2,750	<b>2,752</b>
114,83	614,28	938,73	620,62	2,754	

Fonte: Autor (2017)

Tabela 51 – Densidade real da areia 1.

<b>Areia 1</b>					
<b>a (g)</b>	<b>b (g)</b>	<b>c (g)</b>	<b>d (g)</b>	<b>D'r (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Dr (g/cm<sup>3</sup>)</b>
210,04	709,48	1437	1125,35	2,660	<b>2,658</b>
150,08	642,55	919,35	612,29	2,656	

Fonte: Autor (2017)

Tabela 52 – Densidade real da areia 2.

<b>Areia 2</b>					
<b>a (g)</b>	<b>b (g)</b>	<b>c (g)</b>	<b>d (g)</b>	<b>D'r (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Dr (g/cm<sup>3</sup>)</b>
228,97	727,03	1530,5	1223,24	2,610	<b>2,614</b>
116,08	616,02	943,04	634,07	2,618	

Fonte: Autor (2017)

## APÊNDICE C – EQUIVALENTE DE AREIA

Tabela 53 – Cálculo do equivalente de areia.

<b>Pó de brita</b>			
<b>H1 (cm)</b>	<b>H2 (cm)</b>	<b>EA'</b>	<b>EA</b>
13,45	9,5	70,63	
14,25	9,45	66,32	<b>67,91</b>
15,05	10,05	66,78	
<b>Areia 1</b>			
<b>H1 (cm)</b>	<b>H2 (cm)</b>	<b>EA'</b>	<b>EA</b>
13,95	10	71,685	
14,4	10,1	70,139	<b>70,51</b>
14,2	9,9	69,718	
<b>Areia 2</b>			
<b>H1 (cm)</b>	<b>H2 (cm)</b>	<b>EA'</b>	<b>EA</b>
16,4	11,2	68,293	
15,55	10,95	70,418	<b>69,52</b>
15,25	10,65	69,836	
<b>Areia 3</b>			
<b>H1 (cm)</b>	<b>H2 (cm)</b>	<b>EA'</b>	<b>EA</b>
15,7	8	50,96%	
15	7,9	52,67%	<b>50,88%</b>
15,71	7,7	49,01%	

Fonte: Autor (2017)

## APÊNDICE D – MASSAS ESPECÍFICAS

Tabela 54 – Resultado das massas específicas pelo método do cesto.

<b>Agregado</b>	<b>Ms (g)</b>	<b>Vd(cm³)</b>	<b>μ (g/cm³)</b>
Brita 1	1059,00	378,62	<b>2,797</b>
Brita 0	1995,30	722,00	<b>2,764</b>

Fonte: Autor (2017)

Tabela 55 – Massa específica do pó de brita pelo frasco Chapman

<b>M (g)</b>	<b>L (cm³)</b>	<b>γ' (g/cm³)</b>	<b>γ (g/cm³)</b>
500	380,50	2,77	<b>2,775</b>
500	379,90	2,78	

Fonte: Autor (2017)

Tabela 56 – Massa específica do filer pelo frasco Le Chatelier.

<b>M (g)</b>	<b>Li(cm³)</b>	<b>Lf(cm³)</b>	<b>μ' (g/cm³)</b>	<b>μ (g/cm³)</b>
60	0,50	20,20	3,05	<b>2,993</b>
60	0,30	20,70	2,94	

Fonte: Autor (2017)

Tabela 57 – Massa específica da fibra de sisal pelo método do picnômetro.

<b>a (g)</b>	<b>b (g)</b>	<b>c (g)</b>	<b>d (g)</b>	<b>D'r (g/cm³)</b>	<b>Dr (g/cm³)</b>
115,52	126,08	635,42	631,32	1,635	<b>1,670</b>
114,22	124,61	620,37	616,07	1,706	

Fonte: Autor (2017)

## APÊNDICE E – ESCORRIMENTO DO CAP 50/70

Tabela 58 – Escorrimento para 6% de CAP 50/70.

% de fibra de sisal	Béquer	Peso do béquer (g)	Peso do béquer final (g)	Peso da mistura (g)	Peso retido (g)	E' (%)	E (%)
0,5	1	275,44	281,37	1026,98	5,93	0,58%	<b>0,79%</b>
	2	265,49	275,39	981,12	9,9	1,01%	
1,0	3	266,19	270,22	988,87	4,03	0,41%	<b>0,40%</b>
	4	264,47	268,42	986,42	3,95	0,40%	
1,5	5	261,12	261,85	989,32	0,73	0,07%	<b>0,08%</b>
	6	264,42	265,2	996,82	0,78	0,08%	

Fonte: Autor (2017)

Tabela 59 – Escorrimento para 6,5% de CAP 50/70.

% de fibra de sisal	Béquer	Peso do béquer (g)	Peso do béquer final (g)	Peso da mistura (g)	Peso retido (g)	E' (%)	E (%)
1,0	7	265,69	272,9	992,06	7,21	0,73%	<b>0,58%</b>
	8	262,1	266,47	988,48	4,37	0,44%	
1,5	9	257,27	259,23	982,51	1,96	0,20%	<b>0,17%</b>
	10	264,47	265,9	981,53	1,43	0,15%	
2,0	11	265,63	266,04	983,86	0,41	0,04%	<b>0,07%</b>
	12	265,48	266,4	984,47	0,92	0,09%	

Fonte: Autor (2017)

Tabela 60 – Escorrimento para 7% de CAP 50/70.

% de fibra de sisal	Béquer	Peso do béquer (g)	Peso do béquer final (g)	Peso da mistura (g)	Peso retido (g)	E' (%)	E (%)
1,0	6	264,42	268,53	989,88	4,11	0,42%	<b>0,68%</b>
	11	265,63	275,04	990,31	9,41	0,95%	
1,5	1	275,44	277,93	993	2,49	0,25%	<b>0,19%</b>
	2	265,49	266,87	993,32	1,38	0,14%	
2,0	4	264,47	265,36	990,04	0,89	0,09%	<b>0,08%</b>
	5	261,12	261,81	991,04	0,69	0,07%	

Fonte: Autor (2017)

## APÊNDICE F – ESCORRIMENTO DO ECOFLEX B

Tabela 61 – Escorrimento para 7% de ECOFLEX B.

% de fibra de sisal	Béquer	Peso do béquer (g)	Peso do béquer final (g)	Peso da mistura (g)	Peso retido (g)	E' (%)	E (%)
0,3	4	264,47	265,51	987,69	1,04	0,11%	<b>0,13%</b>
	5	261,12	262,62	989,43	1,5	0,15%	
0,5	6	264,42	265,4	989,84	0,98	0,10%	<b>0,09%</b>
	12	265,48	266,33	992,73	0,85	0,09%	

Fonte: Autor (2017)

## APÊNDICE G – PROPRIEDADES MECÂNICAS (CAP 50/70)

Tabela 62 - Resultados da estabilidade e fluência para 6% de CAP.

	<b>CP 1</b>	<b>CP 2</b>	<b>CP 3</b>	<b>Média</b>
<b>H (mm):</b>	68,9	68,6	68,5	-
<b>Fh</b>	0,897	0,903	0,906	-
<b>Fp</b>	2,0154	2,0154	2,0154	-
<b>Lp</b>	440,00	435,00	320,00	-
<b>ES (Kgf)</b>	795,34	791,86	584,09	<b>723,76</b>
<b>Fluência (mm)</b>	20,52	20,45	21,60	<b>20,86</b>

Fonte: Autor (2017)

Tabela 63 - Resultados da estabilidade e fluência para 6,5% de CAP.

	<b>CP 1</b>	<b>CP 2</b>	<b>CP 3</b>	<b>Média</b>
<b>H (mm):</b>	71,0	68,5	68,5	-
<b>Fh</b>	0,854	0,906	0,904	-
<b>Fp</b>	2,0154	2,0154	2,0154	-
<b>Lp</b>	280,00	355,00	450,00	-
<b>ES (Kgf)</b>	-	648,05	820,29	<b>734,17</b>
<b>Fluência (mm)</b>	20,02	20,74	20,37	<b>20,38</b>

Fonte: Autor (2017)

Tabela 64 - Resultados da estabilidade e fluência para 7% de CAP.

	<b>CP 1</b>	<b>CP 2</b>	<b>CP 3</b>	<b>Média</b>
<b>H (mm):</b>	67,7	67,0	67,3	-
<b>Fh</b>	0,923	0,939	0,931	-
<b>Fp</b>	2,0154	2,0154	2,0154	-
<b>Lp</b>	365,00	405,00	310,00	-
<b>ES (Kgf)</b>	678,82	766,07	-	<b>722,44</b>
<b>Fluência (mm)</b>	20,79	20,79	21,31	<b>20,96</b>

Fonte: Autor (2017)

Tabela 65 - Resultados da resistência à tração para 6% de CAP.

	<b>CP 4</b>	<b>CP 5</b>	<b>CP 6</b>	<b>Média</b>
<b>H (cm):</b>	6,98	6,84	6,92	-
<b>D (cm):</b>	10,12	10,12	10,19	-
<b>Lp</b>	640,00	755,00	600,00	-
<b>F (N)</b>	12653,49	14927,16	11862,64	-
<b>RT (Mpa)</b>	1,14	1,37	1,07	<b>1,19</b>

Fonte: Autor (2017)

Tabela 66 - Resultados da resistência à tração para 6,5% de CAP.

	<b>CP 4</b>	<b>CP 5</b>	<b>CP 6</b>	<b>Média</b>
<b>H (cm):</b>	68,16	61,71	68,23	-
<b>D (cm):</b>	100,99	101,74	102,37	-
<b>Lp</b>	610,00	450,00	525,00	-
<b>F (N)</b>	12060,36	8896,98	10379,81	-
<b>RT (Mpa)</b>	1,12	0,90	0,95	<b>0,99</b>

Fonte: Autor (2017)

Tabela 67 - Resultados da resistência à tração para 7% de CAP.

	<b>CP 4</b>	<b>CP 5</b>	<b>CP 6</b>	<b>Média</b>
<b>H (cm):</b>	6,79	7,01	6,67	-
<b>D (cm):</b>	10,16	10,17	10,15	-
<b>Lp</b>	505,00	495,00	570,00	-
<b>F (N)</b>	9984,39	9786,68	11269,51	-
<b>RT (Mpa)</b>	0,92	0,87	1,06	<b>0,95</b>

Fonte: Autor (2017)

## APÊNDICE H – PROPRIEDADES MECÂNICAS (ECOFLEX B)

Tabela 68 - Resultados da estabilidade e fluência para 6% de ECOFLEX B.

	<b>CP 1</b>	<b>CP 2</b>	<b>CP 3</b>	<b>Média</b>
<b>H (mm):</b>	66,8	67,3	69,3	-
<b>Fh</b>	0,944	0,931	0,888	-
<b>Fp</b>	2,0154	2,0154	2,0154	-
<b>Lp</b>	-	-	330,00	-
<b>ES (Kgf)</b>	-	-	590,76	<b>590,76</b>
<b>Fluência (mm)</b>	20,12	20,82	19,81	<b>20,25</b>

Fonte: Autor (2017)

Tabela 69 - Resultados da estabilidade e fluência para 6,5% de ECOFLEX B.

	<b>CP 1</b>	<b>CP 2</b>	<b>CP 3</b>	<b>Média</b>
<b>H (mm):</b>	68,2	66,0	68,8	-
<b>Fh</b>	0,911	0,963	0,899	-
<b>Fp</b>	2,0154	2,0154	2,0154	-
<b>Lp</b>	170,00	160,00	155,00	-
<b>ES (Kgf)</b>	312,05	310,43	280,76	<b>301,08</b>
<b>Fluência (mm)</b>	17,12	15,69	16,68	<b>16,50</b>

Fonte: Autor (2017)

Tabela 70 - Resultados da estabilidade e fluência para 7% de ECOFLEX B.

	<b>CP 1</b>	<b>CP 2</b>	<b>CP 3</b>	<b>Média</b>
<b>H (mm):</b>	64,9	66,1	64,4	-
<b>Fh</b>	0,988	0,959	1,001	-
<b>Fp</b>	2,0154	2,0154	2,0154	-
<b>Lp</b>	210,00	200,00	255,00	-
<b>ES (Kgf)</b>	418,02	386,38	514,59	<b>439,66</b>
<b>Fluência (mm)</b>	15,81	15,44	15,22	<b>15,49</b>

Fonte: Autor (2017)

Tabela 71 - Resultados da resistência à tração para 6% de ECOFLEX B.

	<b>CP 4</b>	<b>CP 5</b>	<b>CP 6</b>	<b>Média</b>
<b>H (cm):</b>	6,78	6,75	6,72	-
<b>D (cm):</b>	10,20	10,13	10,16	-
<b>Lp</b>	515,00	510,00	615,00	-
<b>F (N)</b>	10182,10	10083,25	12159,21	-
<b>RT (Mpa)</b>	0,94	0,94	1,13	<b>1,00</b>

Fonte: Autor (2017)

Tabela 72 - Resultados da resistência à tração para 6,5% de ECOFLEX B.

	<b>CP 4</b>	<b>CP 5</b>	<b>CP 6</b>	<b>Média</b>
<b>H (cm):</b>	6,61	6,70	6,89	-
<b>D (cm):</b>	10,12	10,22	10,09	-
<b>Lp</b>	540,00	615,00	495,00	-
<b>F (N)</b>	10676,38	12159,21	9786,68	-
<b>RT (Mpa)</b>	1,02	1,13	0,90	<b>1,01</b>

Fonte: Autor (2017)

Tabela 73 - Resultados da resistência à tração para 7% de ECOFLEX B.

	<b>CP 4</b>	<b>CP 5</b>	<b>CP 6</b>	<b>Média</b>
<b>H (cm):</b>	6,44	6,46	6,38	-
<b>D (cm):</b>	10,11	10,14	10,17	-
<b>Lp</b>	595,00	570,00	490,00	-
<b>F (N)</b>	11763,79	11269,51	9687,83	-
<b>RT (Mpa)</b>	1,15	1,10	0,95	<b>1,07</b>

Fonte: Autor (2017)