

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

BRENA LUÍSA RIBEIRO ERICEIRA

**APLICABILIDADE DE FIBRAS DE CANA-DE-AÇÚCAR EM MISTURAS
ASFÁLTICAS DO TIPO SMA**

São Luís

2017

BRENA LUÍSA RIBEIRO ERICEIRA

**APLICABILIDADE DE FIBRAS DE CANA-DE-AÇÚCAR EM MISTURAS
ASFÁLTICAS DO TIPO SMA**

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

Orientadora: Profa. Dra. Maria Teresinha de Medeiros
Coelho

São Luís

2017

Ericeira, Brena Luísa Ribeiro.

Aplicabilidade de fibras de cana-de-açúcar em misturas asfálticas do tipo SMA / Brena Luísa Ribeiro Ericeira. – São Luís, 2017.
106 f.

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

Orientador: Prof. Dra. Maria Teresinha de Medeiros Coelho.

1. SMA. 2. Stone Matrix Asphalt. 3. Mistura asfáltica. 4. Fibras de cana-de-açúcar. 5. Angularidade dos agregados miúdos. I. Título.

CDU 625.85:633.61

BRENA LUÍSA RIBEIRO ERICEIRA

**APLICABILIDADE DE FIBRAS DE CANA-DE-AÇÚCAR EM MISTURAS
ASFÁLTICAS DO TIPO SMA**

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

Aprovada em: 26/06/2017

BANCA EXAMINADORA

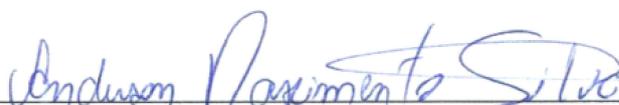


Profa. Dra. Maria Teresinha de Medeiros Coelho (Orientadora)

Doutora em Urbanismo
Universidade Estadual do Maranhão



Prof. Dr. 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 minha mãe, Zenaide, por entender os momentos difíceis por que passei durante o curso e por sempre me incentivar a continuar.

À minha família, em especial a minha tia-avó Maria e minha tia Luilma, pelo fornecimento das fibras de cana-de-açúcar e por todo o apoio dado.

A meu tio Conrado Ribeiro, pelo incentivo e orientação oferecidos ao longo do curso.

À minha orientadora, professora Maria Teresinha, por se mostrar presente durante toda a pesquisa, concedendo ajuda com materiais e instrução sempre que solicitada.

Ao professor Anderson Nascimento, pela ajuda prestada para a realização do ensaio de angularidade e pelo interesse mostrado pela pesquisa.

Ao professor Walter Canales, pela orientação em relação ao ensaio de escorrimento para cada teor de fibra e às dicas oferecidas para o projeto.

Ao laboratorista Carlos pelo auxílio na execução dos ensaios necessários e pela disposição na realização de novos testes.

À Universidade Estadual do Maranhão, pela disponibilização do laboratório, pelos materiais cedidos e por assegurar um ótimo corpo docente para o curso de Engenharia Civil.

A meu amigo e parceiro de laboratório, Rodrigo Rabelo, por toda ajuda oferecida e por proporcionar momentos de descontração.

Agradeço a todos os meus companheiros de curso e às muitas amizades formadas, por tornarem esta jornada menos árdua.

Por fim, agradeço aos demais amigos e terceiros, que me apoiaram e incentivaram ao longo do curso.

“A dúvida é o princípio da sabedoria.”

Aristóteles

RESUMO

Esta pesquisa tem como principal objetivo avaliar o uso de fibras de cana-de-açúcar em misturas asfálticas do tipo SMA. Apesar do alto custo, o uso do SMA se justifica por apresentar maior resistência à deformação permanente e por retardar a reflexão de trincas. O projeto analisa a possibilidade de utilizar uma alternativa de fibras de menor custo e mais acessível em algumas regiões. A metodologia consistiu em pesquisa bibliográfica, ensaios laboratoriais e interpretação dos resultados. Os ensaios foram realizados inicialmente nos agregados para verificar sua qualidade e propiciar uma leitura mais verdadeira dos resultados. Foram realizados ensaios de escorrimento na fibra de cana-de-açúcar para definir o melhor tratamento e, então, foi definido um traço para a mistura asfáltica. Os resultados encontrados se mostraram satisfatórios, exceto pela Estabilidade Marshall, que pôde ter sido amplamente influenciada pela areia utilizada, já que esta não possui uma boa angularidade para misturas do tipo SMA. A areia foi alterada pelo pó de brita, atingindo valores satisfatórios de acordo com a AASHTO MP8-01, confirmando a influência da angularidade do agregado miúdo na estabilidade Marshall. Foram também realizados ensaios para verificar a quebra dos agregados durante a compactação, sendo encontrado melhores resultados para compactação com apenas 50 golpes. O projeto mostra que há possibilidade de uso de fibras de cana-de-açúcar na pavimentação, sendo necessário estudos mais aprofundados para sua melhor aplicação.

Palavras-chave: SMA. Stone Matrix Asphalt. Mistura asfáltica. Fibras de cana-de-açúcar. Angularidade dos agregados miúdos.

ABSTRACT

This research has as its main objective to evaluate the use of sugarcane fibers in asphalt mixtures of SMA. Despite the high cost, the use of SMA is justified because it presents greater resistance to permanent deformation and retards reflective cracking. This project analyzes the possibility of using an alternative of fibers that are cheaper and more accessible in some regions. The methodology consisted of bibliographic research, laboratory tests and results' interpretation. The tests were initially made in aggregates to verify their quality and provide a truer reading of the results. Strain tests were performed on the sugarcane fiber to define the best treatment and then a trace was defined for the asphalt mixture. The results found were satisfactory, except for the Marshall Stability, which could have been widely influenced by the sand used, since it does not have a good angularity for SMA mixtures. The sand was replaced by gravel powder, reaching satisfactory values according to AASHTO MP8-01, confirming the influence of the angularity of the fine aggregate on Marshall stability. Tests were also carried out to verify the aggregate crushing during compaction, with better results for compaction with only 50 blows. The project shows that there is a possibility of using sugarcane fibers in the paving and further studies are needed for its better application.

Key Words: SMA. Stone Matrix Asphalt. Asphalt Mixture. Sugarcane fibers. Angularity of fine aggregates.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Corte transversal de estrutura de pavimento flexível.....	22
Figura 2 – Corte longitudinal de estrutura de pavimento rígido.	22
Figura 3 – Comparação da distribuição de carga nos pavimentos flexível e rígido.....	23
Figura 4 – Comparação entre os tipos de pavimento.....	23
Figura 5 – Representação das curvas granulométricas.....	26
Figura 6 – Comparação entre SMA e misturas asfálticas convencionais.....	27
Figura 7 – Aspecto de uma camada de SMA.	28
Figura 8 – Materiais que compõem o SMA.	30
Figura 9 – Moagem de cana-de-açúcar e produção de açúcar e etanol - safra 2015/2016.	36
Figura 10 – Produção de fibras de cana-de-açúcar.....	38
Figura 11 – Fibras de cana-de-açúcar.....	38
Figura 12 – Peneiras utilizadas no ensaio de granulometria.	40
Figura 13 – Determinação das medidas do agregado através de paquímetro digital.	40
Figura 14 – Amostra espalhada sobre pano absorvente.	41
Figura 15 – Máquina “Los Angeles”.....	42
Figura 16 – Determinação do equivalente de areia.	43
Figura 17 – Amostra submersa em água antes de ser colocada na estufa.	44
Figura 18 – Ensaio de angularidade.	46
Figura 19 – Material utilizado no ensaio.	47
Figura 20 – Determinação da massa específica pelo frasco Chapman.....	48
Figura 21 – Conjunto querosene/filer no frasco Le Chatelier.	49
Figura 22 – Obtenção da densidade da fibra de cana-de-açúcar.	50
Figura 23 – Realização do ensaio de penetração.....	51
Figura 24 – Viscosímetro Saybolt-Furol.	52
Figura 25 – Realização do ensaio de ponto de amolecimento.....	53
Figura 26 – Momento em que a amostra toca a placa de referência.	53
Figura 27 – Execução do ensaio de escorrimento.	54
Figura 28 – Separação dos materiais para molde dos corpos de prova.	56
Figura 29 – Compactação da mistura asfáltica.....	56
Figura 30 – Corpos de prova moldados.....	56
Figura 31 – Desmolde dos corpos de prova.	57

Figura 32 – Determinação da massa seca e do volume do corpo de prova.	57
Figura 33 – Determinação da altura do corpo de prova.	59
Figura 34 – Corpos de prova em banho-maria.	59
Figura 35 – Prensa Marshall utilizada para a determinação da estabilidade, fluência e resistência à tração.....	61
Figura 36 – Aparelho Rotarex.	62
Figura 37 – Realização do ensaio Lottman.	64
Figura 38 – Adesividade a ligante betuminoso após 72 horas.	72

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Faixas granulométricas de SMA pela especificação alemã.	31
Tabela 2 – Faixas granulométricas norte-americanas segundo a AASHTO MP8-01.	32
Tabela 3 – Recomendações finlandesas para adição de fibras em misturas asfálticas tipo SMA em relação ao peso total da mistura ligante-agregado.	35
Tabela 4 – Características e propriedades da mistura SMA.	35
Tabela 5 – Tratamentos verificados para a fibra.	38
Tabela 6 – Características das fibras de cana-de-açúcar utilizadas na pesquisa.	39
Tabela 7 – Frações do agregado miúdo para realização do ensaio de angularidade.	45
Tabela 8 – Temperaturas de compactação e mistura.	55
Tabela 9 – Resultados dos pesos retidos acumulados obtidos nos ensaios de granulometria. .	65
Tabela 10 – Resultados dos ensaios de granulometria dos agregados.	66
Tabela 11 – Enquadramento granulométrico segundo a AASHTO MP8-01 para a faixa de 19 mm.	69
Tabela 12 – Absorção dos Agregados.	70
Tabela 13 – Abrasão "Los Angeles".	71
Tabela 14 – Equivalente de areia.	71
Tabela 15 – Resultados do ensaio de angularidade dos agregados finos.	72
Tabela 16 – Massa específica dos materiais.	73
Tabela 17 – Resultados do ensaio de penetração.	74
Tabela 18 – Valores de SSF encontrados.	74
Tabela 19 – Resultados do ensaio de escorrimento para escolha do tratamento dado à fibra. .	76
Tabela 20 – Resultados do ensaio de escorrimento para maiores teores de fibra.	76
Tabela 21 – Resultados dos parâmetros para os teores de 6% de CAP e 0,9% de fibras.	77
Tabela 22 – Resultados dos parâmetros para o teor 6,5% de CAP e 0,9% de fibras.	77
Tabela 23 – Resultados dos parâmetros para o teor de CAP de 7,0% e 0,9% de fibras.	77
Tabela 24 – Resultados da estabilidade e resistência à tração para o teor de 0,9% de fibras. .	78
Tabela 25 – Resultados dos parâmetros para o teor de 2% de fibras.	78
Tabela 26 – Resultados dos parâmetros para o teor de 3% de fibras.	79
Tabela 27 – Resultados da estabilidade Marshall para diferentes teores de fibras.	79
Tabela 28 – Granulometria da areia proveniente do pó de brita.	80
Tabela 29 – Comparação dos parâmetros para 75 golpes.	80

Tabela 30 – Comparação dos parâmetros para 50 golpes.	81
Tabela 31 - Granulometria dos agregados após o processo de compactação Marshall.....	81
Tabela 32 – Resultados da dosagem Marshall para os teores de 5,5% de CAP e 1,5% de fibras.	82
Tabela 33 – Resultados da dosagem Marshall para os teores de 6,0% de CAP e 1,5% de fibras.	82
Tabela 34 – Resultados da dosagem Marshall para os teores de 6,5% de CAP e 1,5% de fibras.	83
Tabela 35 – Resultados da estabilidade, fluência e resistência à tração para a dosagem Marshall.	83
Tabela 36 – Resultados obtidos no ensaio Lottman.	85
Tabela 37 – Análise dos resultados para o teor ótimo de ligante.	86
Tabela 38 – Comparação de resultados obtidos para misturas do tipo SMA.	86
Tabela 39 – Resultados para SMA com fibras de cana-de-açúcar e AMB.	87
Tabela 40 – Índice de forma.	96
Tabela 41 – Leituras obtidas no ensaio de angularidade.	98
Tabela 42 – Resultados da densidade real, obtidas através do método do picnômetro.	98
Tabela 43 – Massa específica dos agregados graúdos.....	99
Tabela 44 – Massa específica dos agregados miúdos.	99
Tabela 45 – Massa específica do material de enchimento.....	99
Tabela 46 – Massa específica das fibras de cana-de-açúcar.....	99
Tabela 47 – Leituras parciais do ensaio de escorrimento.....	100
Tabela 48 – Resultados do ensaio de Estabilidade Marshall para o teor de 0,9% de fibras...	102
Tabela 49 – Resultados do ensaio de resistência à tração para o teor de 0,9% de fibras.	102
Tabela 50 – Resultados para a dosagem Marshall com os teores de 5,5% de CAP e 1,5% de fibras.	104
Tabela 51 – Resultados para a dosagem Marshall com os teores de 6,0% de CAP e 1,5% de fibras.	105
Tabela 52 – Resultados para a dosagem Marshall com os teores de 6,5% de CAP e 1,5% de fibras.	106

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Curva granulométrica da brita 1.....	66
Gráfico 2 – Curva granulométrica da brita 0.....	67
Gráfico 3 – Curva granulométrica do pó de brita.....	67
Gráfico 4 – Curva granulométrica da areia.....	68
Gráfico 5 – Curva granulométrica do fíler.....	68
Gráfico 6 – Curva granulométrica da mistura.....	69
Gráfico 7 – Resultado do ensaio Saybolt-Furol.....	75
Gráfico 8 – Curvas dos parâmetros encontrados na dosagem Marshall.....	83
Gráfico 9 – Parâmetros determinados na dosagem Marshall para diferentes teores de CAP e 0,9% de fibras.....	101
Gráfico 10 – Parâmetros determinados na dosagem Marshall para diferentes teores de fibra e 6% de CAP.....	103

LISTA DE SIGLAS

AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ADP	Asfalto Diluído de Petróleo
AMB	Asfalto Modificado por Borracha
AMP	Asfalto Modificado por Polímero
ASTM	American Society for Testing and Materials
CAP	Cimento Asfáltico de Petróleo
CP	Corpo de Prova
CPA	Camada Porosa de Atrito
CNT	Confederação Nacional do Transporte
DER	Departamento de Estradas de Rodagem
DMT	Densidade Máxima Teórica
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
EA	Equivalente de Areia
EAP	Emulsão Asfáltica de Petróleo
EM	Especificação de Material
EN	European Norm
ES	Estabilidade Marshall
FAA	Angularidade do Agregado Fino
LSP	Laboratório de Solos e Pavimentação
ME	Método de Ensaio
MR	Módulo de Resiliência
NAPA	National Asphalt Pavement Association
NBR	Norma Brasileira
RBV	Relação Betume-Vazios
RT	Resistência à Tração
RRT	Resistência à Tração Retida
SMA	Stone Matrix Asphalt (Matriz Pétreas Asfáltica)
SSF	Segundo Saybolt-Furol
UEMA	Universidade Estadual do Maranhão
UNESP	Universidade Estadual de São Paulo

UNICA	União da Indústria de Cana-de-açúcar
VAM	Vazios no Agregado Mineral
Vv	Volume de Vazios
VCA	Voids in Coarse Aggregate (Vazios no Agregado Graúdo)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	18
1.1	Objetivos	19
1.1.1	Objetivo Geral.....	19
1.1.2	Objetivos Específicos.....	19
1.2	Justificativa.....	19
2	REFERENCIAL TEÓRICO	21
2.1	Tipos de Pavimentos	21
2.1.1	Pavimento Flexível	21
2.1.2	Pavimento Rígido.....	22
2.1.3	Pavimento Semirrígido	23
2.2	Agregados	24
2.2.1	Quanto à Natureza	24
2.2.2	Quanto ao Tamanho.....	25
2.2.3	Quanto à Distribuição dos Grãos	25
2.3	Ligantes Asfálticos	26
2.4	Revestimentos Asfálticos	27
2.4.1	Stone Matrix Asphalt (SMA)	27
2.4.1.1	<i>Breve Histórico do SMA.....</i>	<i>29</i>
2.4.1.2	<i>Agregados Graúdos</i>	<i>30</i>
2.4.1.3	<i>Agregados Miúdos</i>	<i>32</i>
2.4.1.4	<i>Ligante Asfáltico</i>	<i>32</i>
2.4.1.5	<i>Fíler.....</i>	<i>33</i>
2.4.1.6	<i>Fibras</i>	<i>34</i>
2.4.1.6.1	<i>Bagaço de cana-de-açúcar.....</i>	<i>36</i>
3	METODOLOGIA.....	37
3.1	Pesquisa Bibliográfica.....	37
3.2	Fibras de cana-de-açúcar	37

3.3	Ensaaios Laboratoriais	39
3.3.1	Ensaaios Realizados nos Agregados	39
3.3.1.1	<i>Granulometria dos Agregados</i>	39
3.3.1.2	<i>Índice de Forma</i>	40
3.3.1.3	<i>Absorção dos Agregados Graúdos</i>	41
3.3.1.4	<i>Resistência à Abrasão “Los Angeles”</i>	42
3.3.1.5	<i>Equivalente de Areia</i>	43
3.3.1.6	<i>Adesividade a Ligante Betuminoso</i>	44
3.3.1.7	<i>Angularidade</i>	45
3.3.1.8	<i>Massa Específica dos Agregados Graúdos</i>	46
3.3.1.9	<i>Massa Específica pelo Frasco Chapman</i>	47
3.3.1.10	<i>Massa Específica pelo Frasco Le Chatelier</i>	48
3.3.1.11	<i>Massa Específica pelo método do Picnômetro</i>	49
3.3.2	Ensaaios Realizados no Ligante Asfáltico	50
3.3.2.1	<i>Ensaio de Penetração</i>	51
3.3.2.2	<i>Ensaio de Viscosidade</i>	52
3.3.2.3	<i>Ensaio de Ponto de Amolecimento</i>	52
3.3.3	Ensaaios Realizados na Mistura Asfáltica.....	53
3.3.3.1	<i>Ensaio de Escorrimento</i>	54
3.3.3.2	<i>Dosagem Marshall</i>	55
3.3.3.3	<i>Estabilidade Marshall</i>	59
3.3.3.4	<i>Resistência à Tração</i>	60
3.3.3.5	<i>Ensaio de Extração de Betume</i>	61
3.3.3.6	<i>Ensaio Lottman</i>	62
4	RESULTADOS	65
4.1	Granulometria dos Agregados	65
4.2	Índice de Forma	70
4.3	Absorção dos Agregados Graúdos.....	70
4.4		

4.7	Angularidade	72
4.8	Massa Específica	73
4.9	Ensaio de Penetração	73
4.10	Ensaio de Viscosidade.....	74
4.11	Ensaio de Ponto de Amolecimento	75
4.12	Ensaio de Escorrimento.....	75
4.13	Dosagem Marshall.....	76
4.14	Ensaio Lottman	84
4.15	Discussão dos Resultados Dosagem Marshall	85
5	CONCLUSÃO.....	88
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	91
	APÊNDICE A	

1 INTRODUÇÃO

No Brasil existe um grande investimento no transporte rodoviário em detrimento de formas alternativas de locomoção. Além de serem utilizadas para o transporte de mercadorias, as vias também são essenciais para a circulação diária de milhões de pessoas. Apesar disso, maior parte das rodovias do país não é pavimentada e/ou se encontra em condições precárias.

Além disso, o aumento crescente na quantidade de veículos e o excessivo peso de cargas transportadas contribui para a degradação do pavimento em um curto período de tempo, o que o prejudica em sua avaliação estrutural, referente aos defeitos no pavimento, e em sua avaliação funcional, que diz respeito à qualidade de rolamento, ao conforto que proporciona ao usuário.

Segundo a Confederação Nacional do Transporte (CNT), em pesquisa de 2016, a malha rodoviária pavimentada brasileira compreende 211.468 km de extensão, contrapondo-se a 1.351.979 km de rodovias não pavimentadas, e, da extensão total avaliada, 58,2% apresentaram algum tipo de deficiência, seja no pavimento, na sinalização ou na geometria da via.

Nesse cenário, é importante buscar novas propostas para a melhoria no desempenho dos pavimentos, que visem soluções mais econômicas e duradouras, e que atendam a crescente demanda.

O *Stone Mastic Asphalt* (SMA), pode surgir como uma alternativa por ser mais resistente à reflexão de trincas e à deformação permanente. Trata-se de um revestimento asfáltico com elevada porcentagem de agregados graúdos, o que forma um grande volume de vazios. Esses vazios são preenchidos com mástique asfáltico, constituído por areia, fíler, ligante asfáltico e fibras.

A proposta do projeto consiste em utilizar fibras provenientes do bagaço da cana-de-açúcar em vez das fibras de celulose normalmente utilizadas. As fibras são obtidas ao secar o bagaço e ao passá-lo na peneira nº16. Foram escolhidas por serem bastante comuns em diversas regiões do país, e, portanto, um material mais acessível. As fibras utilizadas neste trabalho foram obtidas de um canal localizado na cidade de Presidente Dutra, no estado do Maranhão.

Além disso, a quantidade de bagaço gerado na produção de açúcar e álcool é muito alta (ÚNICA, 2017). Embora maior parte seja queimada para a geração de energia térmica ou

elétrica, cerca de 20% ainda é rejeitado. Assim, torna-se uma opção favorável também ao meio ambiente, por incentivar a utilização de um material que seria inicialmente descartado.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo Geral

Estudar o aproveitamento do bagaço de cana-de-açúcar como aditivo estabilizante nas misturas asfálticas do tipo SMA em substituição à fibra de celulose.

1.1.2 Objetivos Específicos

Dessa forma, o projeto propõe fazer um estudo sobre o uso do bagaço de cana-de-açúcar em forma de fibras na composição do SMA, analisar suas propriedades mecânicas e verificar se há a possibilidade de sua implantação. Com isso, procura-se obter melhoria na qualidade do pavimento, diminuição dos custos de produção e incentivo à utilização de um material que seria inicialmente lançado no meio ambiente.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Nesta seção, são apresentados dados e definições referentes à pesquisa bibliográfica efetuada para o estudo. São expostas as características dos pavimentos e dos materiais que o compõem e explanados os ensaios necessários para a execução do projeto.

2.1 Tipos de Pavimentos

O pavimento é uma estrutura de camadas que deve resistir aos esforços provenientes do tráfego, de forma a oferecer boas condições de rolamento, tornando as vias confortáveis e seguras, e buscando alcançar a máxima qualidade com os menores custos. Segundo Bernucci *et al.* (2006):

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

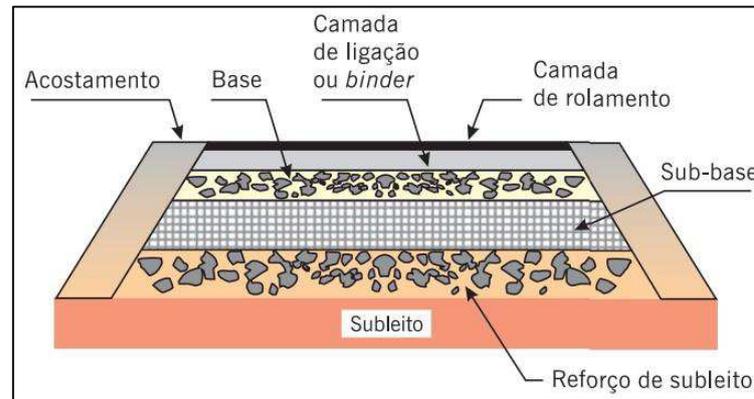
Os pavimentos podem ser rígidos, flexíveis ou semirrígidos. O tipo de pavimento deve ser escolhido de acordo com as características do tráfego da região e com sua condição climática.

2.1.1 Pavimento Flexível

Também chamado de pavimento asfáltico, é aquele em que o revestimento é composto por uma mistura constituída basicamente de agregados e ligante asfáltico. Esse tipo de revestimento melhora as condições de rolamento, impermeabiliza o pavimento, além de transmitir as cargas provenientes do tráfego às demais camadas (BERNUCCI *et al.*, 2006).

O pavimento flexível (Figura 1) é formado pelas camadas de revestimento, base, sub-base e reforço do subleito. Nele, todas as camadas sofrem deformação elástica significativa e, com isso, há distribuição aproximadamente equivalente das cargas recebidas entre elas.

Figura 1 – Corte transversal de estrutura de pavimento flexível.



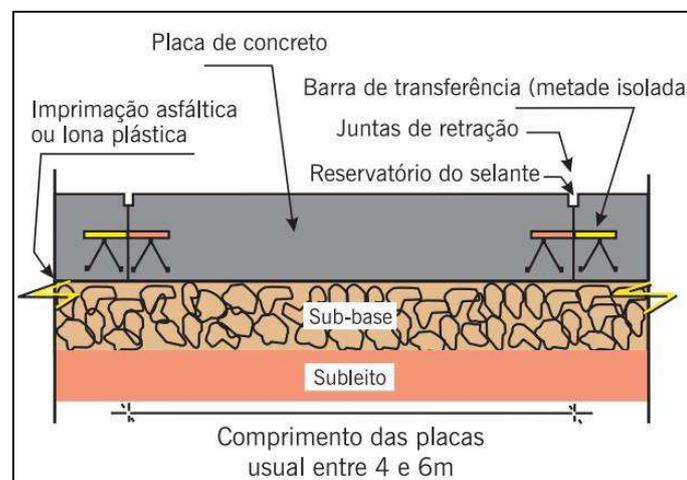
Fonte: Bernucci *et al.* (2006).

2.1.2 Pavimento Rígido

Também chamado de pavimento de concreto-cimento, possui como revestimento placas de concreto, que podem ser armadas ou não com barras de aço. Segundo o DNIT (2006), pavimento rígido é aquele em que o revestimento possui uma elevada rigidez em comparação com as outras camadas, absorvendo, assim, praticamente todas as tensões oriundas do carregamento.

Dessa forma, o solo tem menor responsabilidade, podendo ter apenas as camadas de revestimento, sub-base e reforço do subleito. A Figura 2 apresenta o corte longitudinal de um pavimento rígido.

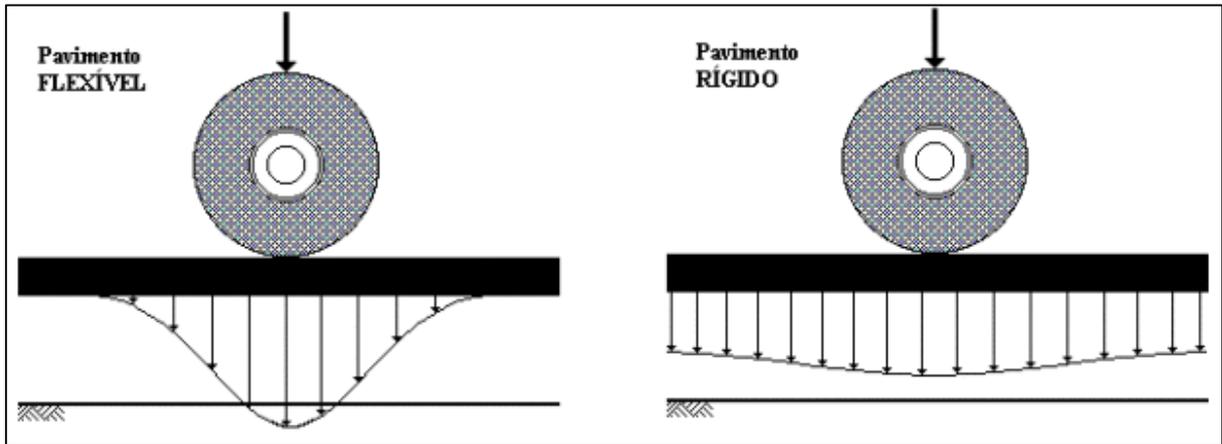
Figura 2 – Corte longitudinal de estrutura de pavimento rígido.



Fonte: Bernucci *et al.* (2006).

Esse tipo de pavimento apresenta maior resistência, maior vida útil, menor custo de manutenção, menor risco de acidentes, menor temperatura superficial, entre outros. A Figura 3 mostra a distribuição de cargas nos pavimentos flexíveis e nos pavimentos rígidos.

Figura 3 – Comparação da distribuição de carga nos pavimentos flexível e rígido.



Fonte: Arnaldo Gunzi (2016).

2.1.3 Pavimento Semirrígido

Trata-se de um meio termo entre os pavimentos rígido e flexível. Possui como revestimento uma mistura asfáltica e possui base cimentada, apresentando maior rigidez. A Figura 4 apresenta uma comparação entre os tipos de pavimento.

Figura 4 – Comparação entre os tipos de pavimento.



Fonte: Pereira (2014, apud ADADA, 2008, p. 23).

2.2 Agregados

Segundo a ABNT NBR 9935/2011, agregado é um material granular, geralmente inerte, que pode ser utilizado em conjunto com um ligante asfáltico para a preparação de argamassa ou concreto.

O tamanho, a densidade e a forma dos grãos podem definir várias das características desejadas em um concreto. Seu desempenho pode variar de acordo com sua rocha de origem, por isso é importante determinar suas características, como adesividade, granulometria e tendência ao desgaste ou abrasão. Dessa forma, devem ser feitos ensaios a fim de analisar o provável comportamento e resistência dos agregados quando em serviço.

Deve-se levar em consideração, além da qualidade do material, a viabilidade econômica e a escolha adequada dos materiais capazes de resistir às cargas às quais o pavimento será submetido.

Os agregados podem ser classificados quanto à natureza, quanto ao tamanho e quanto à distribuição dos grãos.

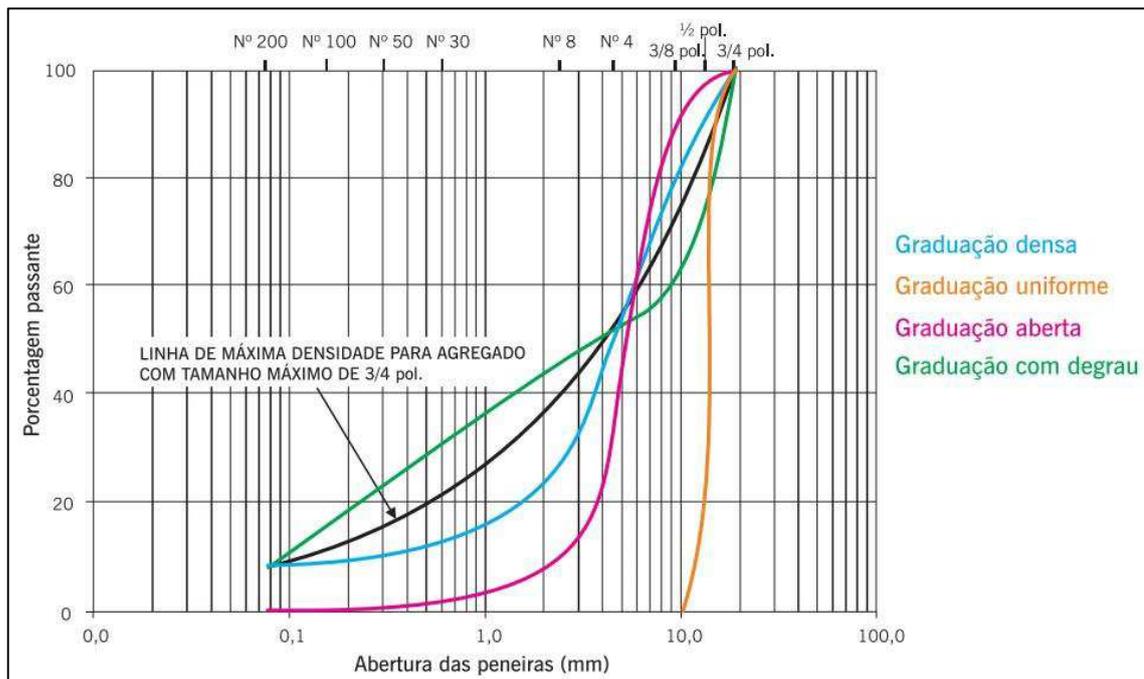
2.2.1 Quanto à Natureza

Segundo Bernucci *et al.* (2006), os agregados podem ser naturais, artificiais ou reciclados.

2.2.2 Quanto ao Tamanho

Os agregados podem ser graúdos, miúdos ou de enchimento. Segundo a NBR 7211/2009:

Figura 5 – Representação das curvas granulométricas.



Fonte: Bernucci *et al.* (2006).

2.3 Ligantes Asfálticos

A pavimentação asfáltica é a mais utilizada no Brasil e no mundo. Em sua composição, encontra-se o ligante betuminoso, um material de estrutura sólida, espesso e aglutinante, de cor escura e reluzente, constituído de misturas complexas de hidrocarbonetos não-voláteis com elevada massa molecular (BERNUCCI, *et al.*, 2006). É utilizado com a função de unir os agregados, além de se tratar de um material impermeabilizante e com flexibilidade e durabilidade em condições controladas.

Os tipos de asfaltos para a pavimentação usados em território brasileiro são o Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP), o Asfalto Diluído de Petróleo (ADP), a Emulsão Asfáltica de Petróleo (EAP) e os Asfaltos Modificados por Polímero (AMP). Dentre eles, o mais utilizado é o CAP, um material semissólido, de alta resistência, flexibilidade e durabilidade, classificado de acordo com sua consistência em CAP 30-45, CAP 50-70, CAP 85-100, CAP 150-200 (BERNUCCI *et al.*, 2006).

A classe mais utilizada no Maranhão é CAP 50-70. Estes números estão associados à faixa de penetração obtida no ensaio. O aquecimento do CAP confere a consistência adequada ao uso e a união entre ligantes e agregados.

2.4 Revestimentos Asfálticos

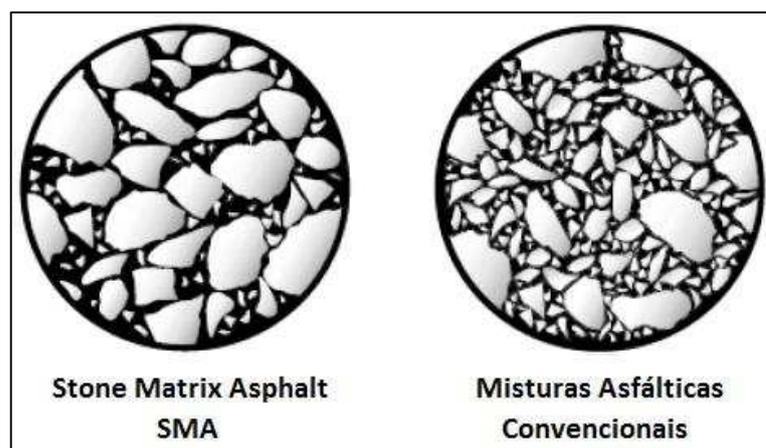
O revestimento é a camada superior do pavimento, portanto, é o responsável por receber as cargas oriundas do tráfego e da ação climática. É sua função fornecer condições adequadas de rolagem, resistência, durabilidade, flexibilidade e impermeabilização do pavimento (CERATTI *et al.*, 2015).

O material do revestimento pode ser preparado em usinas, fixas ou móveis, ou na própria pista, referente aos tratamentos superficiais. Os revestimentos usinados podem ser identificados como: a quente, produzidos com CAP, ou a frio, produzidos com EAP.

2.4.1 Stone Matrix Asphalt (SMA)

O SMA é um revestimento asfáltico usinado a quente, de graduação descontínua. Possui grande quantidade de agregados graúdos, maximizando o contato entre os grãos e aumentando o vazio entre eles (CERATTI *et al.*, 2015). Esse vazio é preenchido pelo mástique asfáltico, uma mistura de ligante e materiais finos – areia, fíler e fibras. A Figura 6 compara a proporção de agregados graúdos e miúdos presente em misturas do tipo SMA e em misturas asfálticas convencionais.

Figura 6 – Comparação entre SMA e misturas asfálticas convencionais.



Fonte: NAPA (2002).

Por conter grande proporção de agregados graúdos, possui macrotextura superficialmente rugosa (Figura 7), proporcionando uma boa drenabilidade superficial e consequente aderência pneu-pavimento.

Figura 7 – Aspecto de uma camada de SMA.

Fonte: Bernucci *et al.* (2006).

É um tipo especial de revestimento, colocado sobre outra camada de concreto asfáltico ou de outro material. Geralmente é aplicado em espessuras que variam de 1,5 a 7,0 centímetros, dependendo da faixa granulométrica. É considerado caro, por necessitar de uma quantidade expressiva de ligante asfáltico, porém possui alta resistência à abrasão, rugosidade duradoura, aderência confiável, além de retardar a reflexão de trincas e a deformação permanente (BLAZEJOWSKI, 2011).

Por apresentar alta resistência, costuma ser utilizado em pavimentos que estão expostos a cargas maiores, como em paradas de ônibus, locais de carregamento e descarregamento, portos, aeroportos, vias com alta frequência de veículos pesados, entre outras utilizações (BERNUCCI *et al.* 2006).

Dessa forma, o SMA possui vantagens e desvantagens em relação à sua composição e uso. Segundo Blazejowski (2011), entre suas vantagens estão:

Entre as desvantagens, Blazejowski (2011) cita:

Surgiu, então, o problema de escorrimento do ligante. Com um elevado teor de aglutinante e poucos finos para mantê-lo na mistura, o ligante tendia a escorrer quando submetido à temperatura de mistura. Após testes laboratoriais, descobriu-se que as fibras funcionam como agentes estabilizadores (BLAZEJOWSKI, 2011).

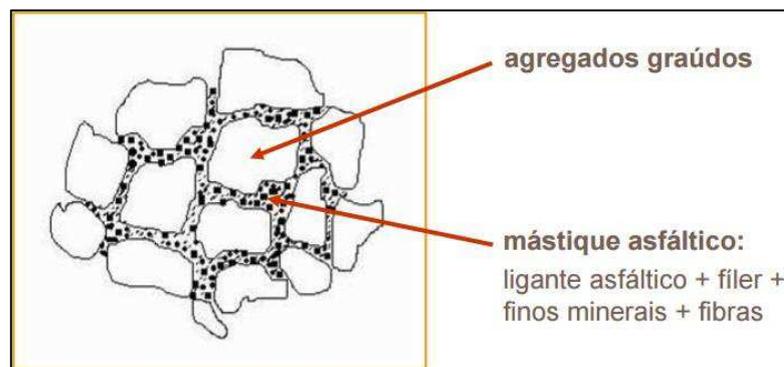
O uso do SMA se intensificou e a partir dos anos 80 passou a ser utilizado amplamente na Europa, em países como Bélgica, Holanda, Suíça, Suécia, Inglaterra, Espanha, entre outros (BERNUCCI *et al.* 2006). Os primeiros esforços para usar o SMA nos Estados Unidos começaram na década de 1990. Profissionais americanos participaram pela primeira vez do *European Asphalt Study Tour* em 1990, onde os pavimentos SMA foram investigados e considerados eficazes em relação à resistência ao esmagamento e à durabilidade (MYERS, 2007).

No Brasil, o SMA foi empregado inicialmente na construção da pista do autódromo de Interlagos em São Paulo no ano 2000. Esse revestimento vem mostrando melhor comportamento funcional e estrutural em relação a outras soluções asfálticas até então empregadas. Desde então sua utilização cresce no país, estando presente em obras de pavimentação em diversos estados, como São Paulo, Minas Gerais, Rio de Janeiro e Salvador (BERNUCCI *et al.* 2006).

2.4.1.2 Agregados Graúdos

O SMA apresenta graduação descontínua, possuindo uma grande quantidade de agregados graúdos (70-80% retido na peneira nº 10) em detrimento de agregados com tamanhos intermediários (BLAZEJOWSKI, 2011). Dessa forma, a mistura apresenta um grande vazio entre os agregados, que é preenchido pelo mástique asfáltico (Figura 8).

Figura 8 – Materiais que compõem o SMA.



Fonte: UNESP (2016).

Os agregados têm como principal função na estrutura do pavimento conferir resistência mecânica e flexibilidade à camada de rolamento. Segundo o Instituto de Asfalto (2001), a quantidade de agregado mineral em misturas asfálticas de pavimentação é geralmente de 90-95% em peso e 75-85% em volume.

Para garantir que os agregados tenham um bom desempenho, é necessário verificar se suas características de granulometria, forma e textura, resistência ao choque e ao desgaste, sanidade, se enquadram nas especificações para o revestimento a ser utilizado.

Segundo Bernucci *et al.* (2006), para o SMA, as especificações incluem porcentagens máximas de 30% para abrasão Los Angeles (AASHTO T 96), 2% para absorção (AASHTO T 85), 15% para ataque aos sulfatos de sódio após 5 ciclos, e 20% aos de magnésio (AASHTO T 104). Além disso, os agregados devem possuir preferencialmente forma cúbica, com índice de forma mínimo de 0,5. Em praticamente todos os países os agregados devem ser 100% britados, tendo, pelo menos 90% deles, duas faces britadas (AASHTO D 5821).

A faixa granulométrica alemã (Tabela 1) foi a primeira a ser publicada como norma para a execução do SMA. Ela denomina quatro tipos: 0/11S, 0/8S, 0/8 e 0/5, sendo o último algarismo o diâmetro nominal máximo do agregado. Os tipos 0/11S e 0/8S são mais recomendados para tráfegos pesados (BERMUCCI *et al.*, 2006).

Tabela 1 – Faixas granulométricas de SMA pela especificação alemã.

Peneira	% EM MASSA			
	0/11S	0/8S	0/8	0/5
< 0,09 mm	9-13	10-13	8-13	8-13
> 2 mm	73-80	73-80	70-80	60-70
> 5 mm	60-70	55-70	45-70	≤ 10
> 8 mm	≥ 40	≤ 10	≤ 10	-
> 11,2 mm	≤ 10	-	-	-

Fonte: DER Paraná (2008).

Já a especificação norte-americana segue a AASHTO MP8-01 (Tabela 2) e possui cinco faixas granulométricas, sendo mais recomendado o uso das faixas de 9,5 mm, 12,5 mm e 19 mm.

Tabela 2 – Faixas granulométricas norte-americanas segundo a AASHTO MP8-01.

Peneira (abertura)	Faixas				
	25 mm	19 mm	12,5 mm	9,5 mm	4,75 mm
37,5 mm	100	-	-	-	-
25 mm	90-100	100	-	-	-
19 mm	30-86	90-100	100	-	-
12,5 mm	26-63	50-74	90-100	100	-
9,5 mm	24-52	25-60	26-78	90-100	100
4,75 mm	20-28	20-28	20-28	26-60	90-100
2,36 mm	16-24	16-24	16-24	20-28	28-65
1,18 mm	13-21	13-21	13-21	13-21	22-36
0,6 mm	12-18	12-18	12-18	12-18	18-28
0,30 mm	12-15	12-15	12-15	12-15	15-22
0,075 mm	8-10	8-10	8-10	8-10	12-15

Fonte: DER Paraná (2008).

2.4.1.3 Agregados Miúdos

A função do agregado fino é preencher vazios entre as partículas de agregado grosso e facilitar o seu intertravamento. A angularidade é uma característica que descreve as propriedades dos agregados finos.

A adoção do ensaio de angularidade do agregado fino (FAA) baseia-se na hipótese de que agregados finos que apresentam alta angularidade possuem suas partículas angulosas ou com textura rugosa, o que resulta em um maior intertravamento das partículas, promovendo maior resistência ao cisalhamento e conseqüente aumento na estabilidade da mistura (GOUVEIA, 2002). A angularidade mínima do agregado fino deve ser de 45% (BLAZEJOWSKI, 2011).

2.4.1.4 Ligante Asfáltico

As misturas de SMA possuem um elevado teor de ligante asfáltico (mínimo de 6%), com o objetivo de evitar um desgaste proveniente do contato entre os agregados graúdos. O alto

teor de ligante faz com que seja necessário utilizar agentes estabilizadores e aditivos a fim de minimizar o escorrimento do ligante e aumentar sua consistência.

As especificações para o uso dos ligantes asfálticos são em geral não-restritivas, e podem ser empregados tanto os asfaltos modificados como asfaltos convencionais.

O asfalto convencional caracteriza-se por suas propriedades aglutinantes e impermeabilizantes, e por suas características de durabilidade, flexibilidade e alta resistência à ação da maioria dos produtos inorgânicos (MOURÃO, 2003).

Os asfaltos modificados por polímero são obtidos através da incorporação do polímero ao asfalto convencional. Seu uso é justificado por possuir algumas vantagens, como: diminuição da suscetibilidade térmica, melhoria das características adesivas e coesivas e aumento da resistência à deformação permanente e da vida útil do pavimento. Além disso, apresentam maior viscosidade sob altas temperaturas, reduzindo a necessidade de inibidores de escorrimento e aumentando a resistência visco-plástica (MOURÃO, 2003).

Também pode ser utilizado asfalto-borracha como ligante asfáltico para o SMA. Esse tipo de asfalto é obtido através da introdução de borrachas de pneus trituradas no asfalto convencional. Proporciona melhoria no desempenho do pavimento, reduzindo a deformação permanente, retardando o aparecimento de trincas e aumentando sua impermeabilização. Além disso, incentiva o reaproveitamento de pneus usados, minimizando os danos ambientais (LEAL, 2013).

2.4.1.5 Fíler

Segundo o DNER-EM 367/97, o fíler é um material de enchimento inerte em relação aos demais componentes da mistura e seus grãos devem apresentar angularidade. Para ser considerado fíler, pelo menos 65% do material deve passar na peneira de 75 μm de abertura de malha quadrada.

A adição de fíler preenche os vazios entre os agregados da mistura, aumentando sua resistência coesiva, seu desempenho mecânico e térmico e sua sensibilidade à água, além de modificar sua trabalhabilidade e melhorar sua resistência ao envelhecimento e à deformação (MOURÃO, 2003).

O fíler pode ser constituído de partículas minerais provenientes dos agregados graúdos ou miúdos empregados na mistura asfáltica, ou de outras fontes como calcário moído, cimento Portland, cal hidratada e cinza volante (BARDINI *et al.*, 1995).

O fíler tem considerável efeito no endurecimento do ligante asfáltico e promove melhoria da resistência do pavimento às deformações permanentes. Dependendo do tamanho da partícula, o fino pode atuar como um fíler ou como um modificador do ligante asfáltico (HAGOS, 2008). As partículas maiores atuam como fíler, preenchendo os vazios deixados pelos agregados graúdos; já as partículas menores se misturam com o ligante asfáltico, aumentando sua consistência e cimentando as partículas maiores.

Devido ao elevado percentual de agregado graúdo e baixo percentual de agregado médio das misturas SMA, o teor de fíler a ser adicionado deve ser maior que em misturas convencionais, situando-se entre 8-13%. Acima de determinados limites, o fíler torna o mástique muito rígido e quebradiço, o que pode comprometer a vida de fadiga do concreto asfáltico (BLAZEJOWSKI, 2011).

2.4.1.6 Fibras

Por conter alto teor de ligante, misturas de SMA necessitam de fibras, que funcionam como aditivo estabilizante. Elas são adicionadas durante a usinagem com a função de evitar a segregação e exsudação da mistura durante o transporte, facilitar a aplicação e evitar o escorrimento do ligante asfáltico (BERNUCCI *et al.*, 2006). As fibras não produzem alterações químicas no asfalto, apenas alterações nas propriedades físicas, permitindo o aumento do teor de aglutinante utilizado na mistura.

As fibras promovem a distribuição dos esforços e maior entrelaçamento dos grãos. Sua presença na mistura faz com que a mesma possa submeter-se a temperaturas altas e baixas sem perder sua eficiência e sem sofrer degradação, prevenindo o aparecimento de trincas e promovendo a resistência ao envelhecimento (LANCHAS, 1999, apud MOURÃO, 2003).

Para Carvalho (1998), as fibras utilizadas na pavimentação podem ser naturais ou artificiais. As naturais são as vegetais, obtidas do coco, bagaço de cana-de-açúcar; as minerais, como os asbestos; e as animais. Já as artificiais, são as produzidas pelo aço, nylon, polipropileno, carbono.

Para controlar a exsudação ou escorrimento do ligante nas misturas SMA são usadas fibras curtas, que podem ser minerais, de celulose ou de vidro. De acordo com as especificações finlandesas, é recomendada a adição de diferentes tipos fibras em misturas asfálticas SMA, conforme a Tabela 3 (PANK, 1995).

Tabela 3 – Recomendações finlandesas para adição de fibras em misturas asfálticas tipo SMA em relação ao peso total da mistura ligante-agregado.

Tipo de Fibra	Faixa Recomendada de Fibra na Mistura (%)
Fibra de Celulose	0,3 – 0,5
Fibra Mineral	0,7 – 0,9
Fibra de Vidro	0,4 – 0,6

Fonte: PANK (1995).

Segundo Hagos (2008), para serem utilizadas em misturas asfálticas, as fibras devem ser fortes e com tamanho adequado. Se forem muito curtas, podem funcionar como fíler, não sendo capazes de retardar o aparecimento de trincas e o envelhecimento do revestimento. E se forem muito longas podem causar problemas durante a mistura.

A principal diferença entre os agentes estabilizadores é seu poder absorvente. Além disso, possuem densidades substancialmente diferentes, o que interfere diretamente em seu volume na mistura. As fibras de alta densidade necessitam de uma maior parcela de adição. Se o estabilizador não funcionar de forma eficiente, aumentar a sua quantidade pode melhorar o desempenho de drenagem. No entanto, quantidades maiores de estabilizadores podem causar problemas inesperados, como a diminuição da trabalhabilidade da mistura. (BLAZEJOWSKI, 2011). A Tabela 4 apresenta os requisitos para o SMA exigidos pela norma AASHTO MP8-01.

Tabela 4 – Características e propriedades da mistura SMA.

Propriedade	Especificação
Teor de asfalto (%)	Mín. 6,0
Volume de vazios (%)	4,0
VAM (%)	Mín. 17
VCA (%)	< VCA _{DRC}
RT (Mpa)	0,6
RRT (%)	Mín. 70
Estabilidade (kgf)	Mín. 632
Escorrimento (%)	Máx. 0,3

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

* VCA_{DRC} = vazios com ar requerido + vazios ocupados pela fibra e asfalto + vazios ocupados pelos agregados miúdos.

2.4.1.6.1 Bagaço da cana-de-açúcar

A cana-de-açúcar é uma gramínea, de origem asiática, utilizada principalmente na produção de açúcar e etanol. Trazida ao Brasil pelos portugueses no início do século XVI, a cana-de-açúcar prosperou inicialmente no Nordeste do país. Hoje, porém, é na região interiorana de São Paulo que se localiza a maior parte dos canaviais (NOVACANA, 2015).

Uma tonelada de cana gera cerca de 320 quilogramas de bagaço (COSTA; BOCCHI, 2011). Segundo UNICA (2017), a safra brasileira 2015/2016 totalizou 666.224 milhões de toneladas de cana-de-açúcar (Figura 9).

Figura 9 – Moagem de cana-de-açúcar e produção de açúcar e etanol - safra 2015/2016.

Estados	Cana-de-açúcar (mil toneladas)	Açúcar (mil toneladas)	Etanol Anidro (mil m ³)	Etanol Hidratado (mil m ³)	Etanol Total (mil m ³)
Acre	86	0	0	5	5
Alagoas	16.382	1.228	215	163	378
Amazonas	216	12	0	6	6
Bahia	3.816	80	46	175	221
Ceará	209	0	0	15	15
Espírito Santo	2.810	71	89	62	151
Goiás	73.522	1.892	1.314	3.375	4.689
Maranhão	2.455	13	146	41	187
Mato Grosso	17.151	337	508	818	1.326
Mato Grosso do Sul	47.817	1.302	646	2.131	2.777
Minas Gerais	64.853	3.245	1.059	2.010	3.069
Pará	682	22	30	11	41
Paraíba	5.586	129	175	170	344
Paraná	42.108	2.807	601	972	1.574
Pernambuco	11.394	822	154	196	350
Piauí	967	67	29	3	33
Rio de Janeiro	1.066	0	0	59	59
Rio Grande do Norte	2.468	138	52	37	89
Rio Grande do Sul	61	0	0	4	4
Rondônia	191	0	0	13	13
Santa Catarina	0	0	0	0	0
São Paulo	368.323	21.567	6.426	8.151	14.577
Sergipe	2.296	105	26	86	112
Tocantins	2.366	0	143	69	213
Região Centro-Sul	617.709	31.221	10.643	17.581	28.225
Região Norte-Nordeste	49.115	2.616	1.017	991	2.008
Brasil	666.824	33.837	11.661	18.572	30.232

Fonte: UNICA (2017).

Apesar da maior parte do bagaço de cana-de-açúcar ser utilizada na produção de açúcar e etanol, ainda existe um excedente sem destinação, que pode gerar problemas ambientais e de estocagem.

3 METODOLOGIA

O estudo em questão teve como base pesquisa bibliográfica para obtenção de dados relativos à pavimentação e aos materiais utilizados; ensaios executados no laboratório de mecânica dos solos e pavimentação da UEMA (LSP), a fim de alcançar os objetivos propostos; e a análise e comparação dos resultados obtidos com os considerados ideais por norma.

O trabalho analisa a viabilidade de substituição das fibras de celulose, geralmente utilizadas nas misturas de SMA, por fibras obtidas do bagaço de cana-de-açúcar.

3.1 Pesquisa Bibliográfica

Para o estudo em questão, a princípio foi realizada uma pesquisa bibliográfica como apoio ao tema estudado, a fim de melhor explicar as características dos pavimentos e dos materiais que o compõem, além de obter dados e intervalos relativos a esses materiais para o tipo de mistura do projeto. Para isso, foram utilizados livros, artigos, normas e trabalhos científicos disponíveis sobre o assunto.

Após a pesquisa bibliográfica, foram executados os ensaios necessários nos materiais e a produção de corpos de prova, que tiveram suas propriedades mecânicas avaliadas.

3.2 Fibras de cana-de-açúcar

As fibras de cana-de-açúcar foram obtidas através do bagaço de cana-de-açúcar, providenciado pela própria autora. Trata-se de um material de fácil acesso em diversas regiões do país e de baixo valor comercial. Apesar de ser muito utilizado para produção de açúcar e etanol, ainda existe um excedente que pode trazer prejuízos ao meio ambiente. O presente estudo surgiu como uma forma de avaliar o aproveitamento deste produto na pavimentação.

O procedimento para obtenção das fibras consistiu na secagem em estufa do bagaço de cana-de-açúcar até que se tornasse quebradiço, seguida de sua moagem através de um pilão, de forma a facilitar sua passagem na peneira de 1,18 mm (Figura 10). Com isso, percebeu-se que havia uma grande quantidade de finos, que poderia interferir negativamente no desempenho da fibra. Assim, foi realizado o ensaio de escorrimento do ligante para cada tipo de fibra, de acordo com a Tabela 5.

Figura 10 – Produção de fibras de cana-de-açúcar.



Fonte: Autora (2017).

Tabela 5 – Tratamentos verificados para a fibra.

Passando	Retido
Nº 16 (1,18 mm)	-
Nº 16 (1,18 mm)	Nº 20 (0,85 mm)
Nº 16 (1,18 mm)	Nº 30 (0,60 mm)
Nº 20 (0,85 mm)	Nº 30 (0,60 mm)

Fonte: Autora (2017).

A partir do ensaio de escorrimento, verificou-se que as fibras que passam na peneira nº 16 e ficam retidas na peneira nº 30 atingiram o melhor desempenho, sendo, assim, utilizadas para a moldagem dos corpos-de-prova através da dosagem Marshall. A Figura 11 mostra as fibras de cana-de-açúcar produzidas.

Figura 11 – Fibras de cana-de-açúcar.



Fonte: Autora (2017).

Em seguida, alguns parâmetros foram avaliados, como o comprimento médio, o diâmetro e a densidade, obtida através do método de ensaio com picnômetro (Tabela 6).

Tabela 6 – Características das fibras de cana-de-açúcar utilizadas na pesquisa.

FIBRAS DE CANA-DE-AÇÚCAR	
Comprimento médio (mm)	5,00
Diâmetro médio (mm)	0,90
Densidade (g/cm ³)	1,343

Fonte: Autora (2017).

3.3 Ensaio Laboratoriais

Os ensaios laboratoriais foram realizados no Laboratório de Mecânica dos Solos e Pavimentação da UEMA (LSP). Os materiais empregados nesta pesquisa foram:

da comparação do material retido em cada peneira e o total da amostra ensaiada. A granulometria é essencial para que seja feito o enquadramento da mistura asfáltica.

Figura 12 – Peneiras utilizadas no ensaio de granulometria.



Fonte: Autora (2017).

3.3.1.2 Índice de Forma

O ensaio foi realizado através do método do paquímetro, regulamentado pela NBR 7809:2006. São desprezados os grãos passantes na peneira de malha 9,5 mm e os que possuem porcentagem retida individual menor ou igual a 5% em sua granulometria e, então, selecionados 200 grãos proporcionalmente às porcentagens retidas individuais. Com o uso do paquímetro, são obtidos o comprimento (a), a largura (b) e a espessura (c) do agregado previamente seco (Figura 13).

Figura 13 – Determinação das medidas do agregado através de paquímetro digital.



Fonte: Autora (2017).

O índice de forma (f) é dado pela média entre as relações b/a e c/b. Se $f = 1$, o agregado é de ótima cubicidade. Se $f = 0$, o agregado é lamelar. Para que o agregado possa ser utilizado, é recomendado o índice de forma mínimo de 0,5.

3.3.1.3 Absorção dos Agregados Graúdos

O ensaio foi realizado segundo a norma DNER-ME 081/98. Para a execução do ensaio, é utilizado o material retido na peneira de malha 4,8 mm. A amostra é lavada e levada à estufa a uma temperatura de 110°C. É, então, deixada para resfriar em temperatura ambiente por um período de 1 h a 3 h e pesada. Em seguida, a amostra deve ser imersa em água por um período aproximado de 24 horas.

Passado esse período, a amostra é retirada da água e espalhada sobre um pano absorvente para a eliminação das películas visíveis de água (Figura 14) e pesada novamente para a determinação da massa na condição saturada.

Figura 14 – Amostra espalhada sobre pano absorvente.



Fonte: Autora (2017).

A absorção pode ser calculada pela expressão 1:

$$A = \frac{Mh - Ms}{Ms} \cdot 100 \quad (1)$$

Onde:

A – Absorção do agregado, em %;

Mh – Massa da amostra saturada, em g;

Ms – Massa da amostra seca, em g.

3.3.1.4 Resistência à Abrasão “Los Angeles”

Este ensaio foi realizado conforme a norma DNER-ME 035/98 e analisa a resistência ao choque e ao desgaste por atrito dos agregados graúdos. O material deve ser previamente lavado, e seco em estufa a uma temperatura entre 105°C e 110°C até atingir temperatura constante.

De acordo com as especificações da norma, são determinadas a graduação B para a brita 1 e a graduação C para a brita 0. Em seguida, as amostras dos agregados graúdos são colocadas na máquina “Los Angeles” (Figura 15), juntamente com uma carga abrasiva de 11 esferas para brita 1 e 8 esferas para brita 0, e submetidas a 500 rotações a uma velocidade de 30 rpm a 33 rpm.

Figura 15 – Máquina “Los Angeles”.



Fonte: Autora (2017).

Após as rotações, o material foi retirado da máquina e colocado na peneira com malha de 1,7 mm. O material passante é rejeitado e o retido é lavado e seco em temperatura entre 105°C e 110°C durante no mínimo 3 horas.

A abrasão “Los Angeles” é dada pela expressão 2:

$$A_n = \frac{M_n - M'_n}{M_n} \cdot 100 \quad (2)$$

Onde:

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

n – graduação escolhida para o ensaio;

M_n – massa total da amostra seca colocada na máquina, em g;

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

3.3.1.5 Equivalente de Areia

Este ensaio tem o objetivo de analisar a pureza do agregado miúdo, verificando a presença de argila ou material orgânico no material. Foi realizado em amostras de pó de brita e areia que passam na peneira de 4,8 mm, conforme a norma DNER-ME 054/97.

Para a realização do ensaio, a solução é colocada na proveta até atingir a marca de 10 cm da base. Em seguida, a amostra é colocada em um recipiente para medição, adequadamente rasada na superfície e transferida para a proveta com o auxílio de um funil. São aplicados golpes com a palma da mão no fundo da proveta, a fim de deslocar as bolhas de ar e a amostra é deixada em repouso por 10 minutos.

Após esse período, a proveta é tapada com uma rolha de borracha e agitada em um movimento alternado e horizontal, de acordo com o especificado por norma. O tubo lavador é inserido até o fundo da proveta, de forma a lavar suas paredes e a preenchê-la até a segunda marca de referência. A amostra é deixada em repouso por 20 minutos (Figura 16).

Figura 16 – Determinação do equivalente de areia.



(a) Areia natural.

(b) Pó de brita.

Fonte: Autora (2017).

A medição é feita com uma régua. A primeira leitura determina o nível superior da argila em suspensão, enquanto a segunda leitura é obtida com o auxílio de um pistão inserido na proveta e determina o nível superior da areia. O resultado é obtido através da média de três equivalentes de areia, obtidos através da expressão 3:

$$EA = \frac{H'}{H} \cdot 100 \quad (3)$$

Onde:

EA – Equivalente de areia, em %;

H – Leitura no topo da argila, em cm;

H' – Leitura no topo da areia, em cm.

3.3.1.6 Adesividade a Ligante Betuminoso

O ensaio de adesividade verifica a capacidade de aderência do agregado ao ligante betuminoso e foi realizado conforme a norma DNER-ME 078/94. A amostra utilizada corresponde a 500 g de material passante na peneira de 19 mm e retido na peneira de 12,7 mm. A amostra é lavada e colocada na estufa a 120°C por 2h.

Em seguida, o agregado e o ligante são aquecidos a temperaturas de 100°C e 120°C, respectivamente. É colocado 17,5 g de ligante sobre o agregado, buscando seu completo envolvimento.

O conjunto ligante/agregado é deixado para esfriar em uma superfície lisa e depois colocado em um frasco de vidro, sendo totalmente submerso em água destilada (Figura 17). O frasco é deixado em estufa a temperatura de 40°C por 72 horas.

Figura 17 – Amostra submersa em água antes de ser colocada na estufa.



Fonte: Autora (2017).

O resultado é obtido de forma visual. É considerado satisfatório apenas se não houver nenhum deslocamento da película betuminosa ao fim de 72 horas.

3.3.1.7 Angularidade

No caso do agregado miúdo, a angularidade é determinada através do percentual de vazios do agregado no estado solto, de acordo com o método A da norma ASTM C 1252/03. O ensaio foi realizado para a areia e para o pó de brita.

Inicialmente pesa-se o cilindro juntamente com a placa de vidro. Em seguida, o recipiente é completamente cheio com água destilada e coberto com a placa de vidro, de forma a impedir que existam bolhas de ar em seu interior. O conjunto é pesado para a determinação do volume do cilindro.

Para compor o material a ser ensaiado, são separadas frações dos agregados miúdos estudados de acordo com o método A da norma, conforme a Tabela 7.

Tabela 7 – Frações do agregado miúdo para realização do ensaio de angularidade.

Fração individual	Massa (g)
Nº8 - Nº16	44
Nº16 - Nº30	57
Nº30 - Nº50	72
Nº50 - Nº100	17

Fonte: ASTM C 1252/03.

As frações devem ser misturadas para o ensaio. O cilindro é centralizado no equipamento, o funil é posicionado no suporte e tapado com a placa de auxílio do equipamento. O ensaio consiste em colocar a amostra do agregado no funil e desbloquear a passagem, permitindo que o material caia no recipiente cilíndrico. O excesso de material é retirado com a placa, de forma a rasar o recipiente, com o cuidado de evitar qualquer ação que possa interferir na compactação no agregado e, conseqüentemente, no resultado.

Em seguida, são dadas pequenas batidas no cilindro para a compactação do material, de forma a evitar perda de material durante o manuseio. O recipiente é limpo externamente e pesado. O ensaio deve ser realizado três vezes.

A Figura 18 apresenta a passagem do agregado miúdo pelo funil e a pesagem do material após a compactação.

Figura 18 – Ensaio de angularidade.



Fonte: Autora (2017).

O valor da angularidade é dado pela expressão 4:

$$U(\%) = \frac{V - (W - c)/D_r}{V} \cdot 100 \quad (4)$$

Onde:

U – Angularidade do agregado miúdo, em %;

V – Volume do cilindro, em cm³;

c – Peso do cilindro, em g;

D_r – Densidade real do material ensaiado, em g/cm³.

3.3.1.8 Massa Específica dos Agregados Graúdos

O ensaio foi realizado conforme a norma DNER-ME 081/98. Para a realização do ensaio os agregados devem estar totalmente secos. É utilizado um cesto de malha metálica completamente preenchido com os agregados graúdos para a determinação da massa seca da amostra. Com a ajuda de um recipiente com água e um suporte metálico, o cesto preenchido com agregados é imerso em água para obtenção do volume deslocado (Figura 19).

Figura 19 – Material utilizado no ensaio.



(a) Cesto metálico.

(b) Pesagem hidrostática.

Fonte: Autora (2017).

A massa específica é encontrada pela expressão 5:

$$\mu = \frac{Ms}{Vd} \quad (5)$$

Onde:

μ – Massa específica do agregado graúdo, em g/cm³;

M_s – Massa seca da amostra, em g;

V_d – Volume deslocado, em cm³.

3.3.1.9 Massa Específica pelo Frasco Chapman

O ensaio tem o propósito de determinar a massa específica dos agregados miúdos – areia e pó de brita – e foi realizado de acordo com a norma DNER-ME 194/98. O material utilizado passa na peneira de 4,8 mm e fica retido na peneira de 0,075 mm, e deve ser seco em estufa a temperatura de 110°C.

Inicialmente, o frasco é preenchido com água até a marca de 200 cm³ e deixado em repouso por alguns minutos para que a água em suas paredes escoe. Em seguida, uma amostra de 500 g do material é colocada cuidadosamente no frasco, acompanhada de leves batidas no fundo do recipiente para a eliminação de bolhas de ar (Figura 20).

Figura 20 – Determinação da massa específica pelo frasco Chapman.



(a) Areia natural.

(b) Pó de brita.

Fonte: Autora (2017).

O resultado é dado pelo volume ocupado pelo conjunto água e agregado, obtido através da leitura do nível atingido pela água no gargalo do frasco, aplicado na seguinte expressão 6:

$$\gamma = \frac{500}{L - 200} \quad (6)$$

Onde:

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

L – Leitura final no frasco Chapman, em cm³.

3.3.1.10 Massa Específica pelo Frasco Le Chatelier

O ensaio foi realizado conforme a DNER-ME 085/94, a fim de determinar a massa específica do material de enchimento – cimento Portland. Foi utilizada uma amostra de 60 g do material.

Inicialmente é colocado querosene no frasco Le Chatelier até atingir uma marca entre 0 e 1 ml, equivalente a leitura inicial. Em seguida, uma amostra do fíler é colocada lentamente no frasco, com o cuidado de não deixar o material se prender às paredes e de retirar bolhas de ar. A Figura 21 mostra o conjunto querosene/fíler no frasco Le Chatelier.

Figura 21 – Conjunto querosene/fíler no frasco Le Chatelier.



Fonte: Autora (2017).

A leitura final é realizada e a massa específica do cimento Portland pode ser calculada pela expressão 7:

$$\mu = \frac{60}{L_f - L_i} \quad (7)$$

Onde:

μ – Massa específica do material de enchimento, em g/cm³;

L_i – Leitura inicial do querosene, em cm³;

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

3.3.1.11 Massa Específica pelo Método do Picnômetro

O ensaio foi feito para a obtenção da massa específica da fibra de cana-de-açúcar e foi executado de acordo com a norma DNER-ME 093/94. Para sua realização, primeiramente é obtido o peso do picnômetro limpo. Em seguida, coloca-se uma amostra seca de pelo menos 10g do material a ser ensaiado no frasco e obtém-se o segundo peso.

Inserir-se água no frasco até que a amostra seja totalmente coberta e deixa-se ferver por aproximadamente 15 minutos a fim de expulsar bolhas de ar presentes no conjunto. O frasco é deixado para resfriar em temperatura ambiente e completado com água. O picnômetro é colocado em banho de água e, com a ajuda de um termômetro, anota-se a temperatura do banho (Figura 22). O conjunto é pesado.

Figura 22 – Obtenção da densidade da fibra de cana-de-açúcar.



(a) Amostras sendo fervidas.

(b) Amostras em banho d'água.

Fonte: Autora (2017).

O frasco é esvaziado, preenchido completamente com água destilada e colocado em banho de água. Anota-se a temperatura do banho e pesa-se o conjunto.

O valor da densidade do material é dado pela expressão 8. O ensaio foi realizado com dois frascos. O resultado final é a média dos valores encontrados.

$$D_R = \frac{P_2 - P_1}{(P_4 - P_1) - (P_3 - P_2)} \quad (8)$$

Onde:

D_R – Densidades real, em g/cm^3 ;

P_1 – Peso do picnômetro, em g;

P_2 – Peso do picnômetro mais a amostra, em g;

P_3 – Peso do picnômetro mais a amostra, mais água, em g;

P_4 – Peso do picnômetro mais água, em g.

3.3.2 Ensaio Realizados no Ligante Asfáltico

O ligante betuminoso utilizado no presente estudo foi o CAP 50/70. Alguns ensaios são necessários para garantir que o material esteja de acordo com o exigido por norma e possa ser utilizado na pavimentação. Os ensaios realizados são detalhados neste tópico.

3.3.2.1 Ensaio de Penetração

O ensaio é realizado de acordo com a norma DNIT-ME 155/2010. Consiste na profundidade, em décimos de milímetro, que uma agulha padronizada penetra verticalmente em uma amostra de ligante em condições predefinidas de temperatura, carga e tempo.

A amostra selecionada de CAP é colocada em um recipiente padrão e mantida sob temperatura de 25°C em banho d'água. O recipiente é levado ao penetrômetro (Figura 23), onde a agulha, devidamente limpa, é encostada na superfície da amostra para a leitura inicial. A agulha é liberada, com carga total de 100 g para o “conjunto penetração”, por um período de 5 segundos. A leitura final é obtida após esse tempo.

Figura 23 – Realização do ensaio de penetração.



Fonte: Autora (2017).

A penetração foi realizada para três pontos distintos da amostra e pode ser calculada pela expressão 9. O resultado é encontrado pela média das penetrações.

$$P = Lf - Li \quad (9)$$

Onde:

P – Penetração, em décimo de mm;

Li – Leitura inicial, em décimo de milímetro;

Lf – Leitura final, em décimo de milímetro.

3.3.2.2 Ensaio de Viscosidade

A viscosidade caracteriza a resistência de um fluido ao escoamento em uma determinada temperatura. O ensaio foi realizado pelo método Saybolt-Furol, regido pela NBR 14950.

As temperaturas escolhidas para o ensaio foram 130°C, 149°C, 163°C e 177°C. A amostra deve ser aquecida até atingir 10°C acima da temperatura desejada e deixada para resfriar até que o termômetro indique o valor ideal. A amostra de ligante é inserida no viscosímetro Saybolt-Furol (Figura 24), com a passagem vedada, até que o equipamento atinja a temperatura escolhida. A vedação é retirada e o ligante escorre para um recipiente padrão de 60 ml. O tempo para que amostra alcance a marca do recipiente é cronometrado e chamado de Segundo Saybolt-Furol (SSF). O processo é repetido para as demais temperaturas.

Figura 24 – Viscosímetro Saybolt-Furol.



Fonte: Autora (2017).

Com os resultados encontrados, elabora-se um gráfico em função do SSF e da temperatura para determinar as temperaturas ideais de mistura e de compactação para o revestimento asfáltico.

3.3.2.3 Ensaio de Ponto de Amolecimento

Também conhecido como ensaio de anel e bola, foi realizado de acordo com a norma DNIT-ME 131/2010. É responsável por correlacionar a temperatura na qual o asfalto amolece quando aquecido sob certas condições e atinge um determinado escoamento.

O ligante asfáltico aquecido é colocado em dois anéis metálicos e deixado para resfriar em superfície lisa por cerca de 30 minutos. Em seguida, os anéis são acoplados com as guias e esferas em um béquer e preenchido com água, como mostrado na Figura 25.

Figura 25 – Realização do ensaio de ponto de amolecimento.



Fonte: Autora (2017).

O conjunto é aquecido e, com o auxílio de um termômetro, verifica-se as temperaturas em que as amostras de CAP tocam a placa de referência (Figura 26). Se a diferença entre as temperaturas ultrapassar 2°C , o ensaio deve ser repetido.

Figura 26 – Momento em que a amostra toca a placa de referência.



Fonte: Autora (2017).

3.3.3 Ensaios Realizados na Mistura Asfáltica

Nesta seção serão explanados o método de dosagem dos corpos de prova, assim como seus parâmetros, a escolha do tratamento dado para a fibra e os ensaios realizados para verificação das características da mistura asfáltica estudada.

3.3.3.1 Ensaio de Escorrimento

O ensaio foi realizado pelo método *Schellenberg*, segundo a norma europeia EN 12697-18 (apud MIRANDA, 2013). Tem o objetivo de verificar o grau de escorrimento do ligante na mistura betuminosa para diferentes teores de fibra.

Inicialmente, o ensaio foi realizado para diferentes tratamentos de fibra, segundo a Tabela 5, com o objetivo de definir o melhor tratamento para a fibra. Foi utilizado um teor de 0,5%, fixado de acordo com a quantidade ideal de fibras na mistura por norma.

Definido o melhor tratamento para a fibra, foram escolhidos os teores de fibra de 0,9% e 1,5%, já que o teor de 0,5% apresentou certa exsudação. Foram produzidos três lotes de misturas betuminosas para cada teor. As amostras deveriam conter 1000 g de mistura asfáltica, respeitando o traço encontrado e as temperaturas obtidas através do ensaio de viscosidade.

Para cada teor de fibra são escolhidas duas amostras, que são colocadas em recipientes cilíndricos de vidro, com diâmetro de 100 mm e capacidade mínima de 800 ml, e levadas para a estufa na temperatura de 165°C por 1h ± 1 min. Em seguida, os recipientes são retirados da estufa e virados, com a base pra cima, por 10 segundos. A mistura asfáltica retida no frasco é pesada. O procedimento é mostrado na Figura 28.

Figura 27 – Execução do ensaio de escorrimento.



(a) Pesagem da amostra.

(b) Recipiente virado.

(c) Pesagem da mistura retida.

Fonte: Autora (2017).

O escorrimento é dado pela relação entre o valor retido e a massa total da mistura. O valor final é dado pela média aritmética entre as duas amostras e não deve ultrapassar 0,3%, sendo desejável que seja igual ou inferior a 0,2%.

3.3.3.2 Dosagem Marshall

O método de dosagem Marshall, normatizado pelo DNER-ME 043/95, é o mais utilizado no Brasil. Com ele, é possível calcular alguns parâmetros, como percentual de vazios, densidade aparente, densidade máxima teórica, relação betume-vazios, vazios preenchidos de betume e vazios do agregado mineral. Consiste em uma forma de elaborar copos de prova e avaliar os parâmetros mecânicos de estabilidade, resistência à tração e fluência, além de definir o teor ótimo de ligante no projeto.

A dosagem Marshall deve ser realizada após a obtenção das massas específicas dos materiais a serem utilizados e do enquadramento granulométrico da mistura de acordo com a faixa escolhida.

Foram definidos 3 teores de ligante CAP 50/70 e produzidos 6 CP's para cada teor, sendo 3 para a avaliação da estabilidade Marshall e 3 para a verificação da resistência à tração. As temperaturas utilizadas foram encontradas através do ensaio de viscosidade e estão dispostas na Tabela 8.

Tabela 8 – Temperaturas de compactação e mistura.

Temperatura (°C)	
Compactação	140
Ligante	165
Agregado	175

Fonte: Autora (2017).

O procedimento para a moldagem dos corpos de prova está descrito abaixo:

1. Secar os agregados em estufa;
2. Pesar cada fração de acordo com o enquadramento granulométrico obtido, de modo que, após mistura com o ligante, produza um CP de aproximadamente 1200 g.
3. Pré-aquecimento dos agregados em estufa;
4. Aquecer o ligante até a temperatura determinada;
5. Aquecer os agregados até a temperatura determinada;
6. Aquecimento de molde metálico à temperatura de 100°C;
7. Misturar os agregados de modo a formar uma cratera para receber o ligante;
8. Misturar manualmente, por um período de 2 a 3 minutos, até a completa cobertura dos agregados;

9. Compactação manual ou mecânica, com 50 ou 75 golpes para cada lado do CP, em temperatura determinada.
 10. Após o período mínimo de 12 horas, os CP's podem ser desmoldados.
- O processo de dosagem Marshall é mostrado nas figuras 28 a 31.

Figura 28 – Separação dos materiais para molde dos corpos de prova.



Fonte: Autora (2017).

Figura 29 – Compactação da mistura asfáltica.



(a) Manual.

(b) Mecânica.

Fonte: Autora (2017).

Figura 30 – Corpos de prova moldados.



Fonte: Autora (2017).

Figura 31 – Desmolde dos corpos de prova.



Fonte: Autora (2017).

São escolhidos 3 CP's para cada teor de ligante para determinação dos parâmetros descritos a seguir, a fim de possibilitar a elaboração dos gráficos necessários para encontrar o teor ótimo de projeto. A Figura 32 apresenta o procedimento de determinação da densidade aparente através da obtenção da massa seca e do volume do corpo de prova.

Figura 32 – Determinação da massa seca e do volume do corpo de prova.



(a) Pesagem convencional.

(b) Pesagem hidrostática.

Fonte: Autora (2017).

1. Densidade aparente (d_{ap})

$$d_{ap} = \frac{m}{V_{cp}} \quad (10)$$

Onde:

d_{ap} – Densidade aparente, em g/cm^3 ;

m – Massa seca do CP, em g;

V_{cp} – Volume do CP, em cm^3 .

2. Densidade máxima teórica (DMT)

$$DMT = \frac{100}{\sum \left[\frac{\%Mat}{D} \right]} \quad (11)$$

Onde:

DMT – Densidade máxima teórica, em g/cm^3 ;

% Mat – Porcentagem de cada material presente na mistura;

D – densidade correspondente a cada material, em g/cm^3 .

3. Percentual de vazios (V_v)

$$V_v(\%) = \left[\frac{DMT - d_{ap}}{DMT} \right] \cdot 100 \quad (12)$$

4. Vazios preenchidos de betume (VCB)

$$VCB(\%) = \frac{d_{ap} \cdot \%B}{D_b} \quad (13)$$

Onde:

% B – Porcentagem de CAP presente na mistura;

D_b – Densidade do CAP.

5. Vazios do agregado mineral (VAM)

$$VAM(\%) = V(\%) + VCB(\%) \quad (14)$$

6. Relação betume-vazios (RBV)

$$RBV(\%) = \left[\frac{VCB(\%)}{VAM(\%)} \right] \cdot 100 \quad (15)$$

Com o uso de um paquímetro, foram realizadas quatro leituras em posições equidistantes para a altura de cada CP (Figura 33), a fim de determinar sua altura média, que será posteriormente utilizada para a determinação da estabilidade Marshall e da resistência à tração.

Figura 33 – Determinação da altura do corpo de prova.



Fonte: Autora (2017).

3.3.3.3 Estabilidade Marshall

Segundo o DNER-ME 043/95, Estabilidade Marshall é a resistência máxima à compressão radial obtida em um corpo de prova moldado de acordo com o processo de dosagem Marshall. O ensaio de estabilidade fornece, simultaneamente, os valores de estabilidade e de fluência.

Os corpos de prova devem ser colocados em banho-maria em uma temperatura de $(60 \pm 1) ^\circ\text{C}$ por um período de 30 a 40 minutos (Figura 34). Em seguida, são levados ao molde de compressão, que deve estar em uma temperatura de 21°C a 38°C .

Figura 34 – Corpos de prova em banho-maria.



Fonte: Autora (2017).

O molde de compressão é colocado na prensa Marshall e o medidor de fluência é ajustado. A prensa é ligada e as leituras de estabilidade e fluência são obtidas. O espaço de tempo entre a retirada do CP do banho-maria e o seu rompimento não deve ultrapassar 30 segundos.

A leitura da estabilidade deve ser corrigida segundo a expressão 16.

$$ES = Lp \cdot Fp \cdot Fh \quad (16)$$

Onde:

ES – Estabilidade Marshall, em kgf;

Lp – Leitura da prensa, em kgf;

Fp – Fator de correção da prensa;

Fh – Fator de correção em função da altura do corpo de prova.

De acordo com a norma, o valor de Fh é dado pela expressão 17:

$$Fh = 927,23 \cdot h^{-1,64} \quad (17)$$

Onde:

h – Altura do corpo de prova, em mm.

3.3.3.4 Resistência à Tração

O ensaio determina a resistência à tração por compressão diametral dos corpos de prova moldados de acordo com a dosagem Marshall e foi realizado conforme o DNIT-ME 136/2010.

Após a determinação da altura e diâmetro médios dos corpos de prova, estes são colocados em estufa ou em sistema de refrigeração por um período de 2 horas, de modo a atingir a temperatura de $(25 \pm 0,1) ^\circ\text{C}$, verificada com o auxílio de um termômetro. Em seguida, o CP é colocado em um molde que possui dois frisos metálicos, e ajustado na prensa Marshall, mostrada na Figura 35.

Figura 35 – Prensa Marshall utilizada para a determinação da estabilidade, fluência e resistência à tração.



Fonte: Autora (2017).

O equipamento é ligado e a leitura (F) é feita no momento em que se dá a ruptura segundo o plano diametral vertical. A resistência à tração é encontrada pela expressão 18:

$$\sigma = \frac{2 \cdot F}{100\pi Dh} \quad (18)$$

Onde:

σ - Resistência à tração, em MPa;

F – Leitura da prensa, em N;

D – Diâmetro do corpo de prova, em cm;

h – Altura do corpo de prova, em cm.

3.3.3.5 Ensaio de Extração de Betume

O ensaio foi realizado conforme a norma DNER-ME 053/94 com o principal objetivo de verificar a alteração da granulometria dos agregados após submetidos a 50 golpes e 75 golpes durante a compactação dos corpos de prova.

Os CP's selecionados para o ensaio são colocados em estufa em temperatura de 100-120°C por 1 h. Em seguida, são amassados e quarteados para a obtenção de uma amostra de cerca de 1000g. A amostra é inserida no aparelho Rotarex (Figura 36) juntamente com gasolina e deixada em repouso por cerca de 15 minutos.

Figura 36 – Aparelho Rotarex.



Fonte: Autora (2017).

Após esse período o aparelho é ligado, tendo sua velocidade aumentada gradativamente, e o conjunto betume-solvente escoam para fora do equipamento. A gasolina é adicionada repetidamente até que escoe com uma cor mais clara, indicando baixa presença de betume.

Os agregados são retirados do aparelho e deixados em temperatura ambiente para que o solvente evapore e colocados em estufa a temperatura de 80-100°C até constância de peso. Após esse processo, a granulometria é realizada e comparada com o enquadramento utilizado para a mistura.

A porcentagem de betume pode ser calculada pela expressão 19:

$$P = \frac{\text{Peso do betume extraído}}{\text{Peso da amostra total}} \cdot 100 \quad (19)$$

3.3.3.6 Ensaio Lottman

O ensaio tem o objetivo de verificar a sensibilidade da mistura asfáltica diante da ação destrutiva da água. Foi realizado segundo a AASHTO T 283 (apud BERNUCCI *et al.*, 2006), para o teor ótimo de projeto encontrado através da dosagem Marshall.

Para sua realização são produzidos seis corpos de prova com volumes de vazios localizados entre 6% e 8%. Assim, é necessário uma alteração do número de golpes aplicados durante a compactação da mistura. Três CP's são selecionados para serem submetidos ao ensaio de resistência à tração, funcionando como parâmetros para as RT's com o número de golpes encontrado.

Os outros três CP's são levados a um recipiente e imersos em água destilada. Em seguida, aplica-se vácuo a uma pressão de 250 mmHg a 650 mmHg por um período de 5 a 30 minutos, de forma a atingir uma saturação entre 55% e 80%.

A saturação é dada pela expressão 20:

$$S (\%) = \frac{P_f - P_i}{V_v \cdot P_i} \cdot 100 \quad (20)$$

Onde:

S (%) – Saturação, em %;

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

Pf – Peso do corpo de prova após aplicação do vácuo, em g;

Vv – Volume de vazios, em %.

Verificada a saturação, os corpos de prova são envoltos em um filme plástico e colocados em um saco plástico com 10 ml de água destilada adicionais. São então levados para congelamento a uma temperatura de $-18 \pm 3^\circ\text{C}$ por um período de 16 a 18 h.

Em seguida, os CP's são colocados em banho-maria em temperatura de 60°C por 24 ± 1 h, sendo retirados dos plásticos logo após a imersão.

Os corpos de prova são retirados do banho a 60°C e levados a outro banho em temperatura de 25°C por 2 ± 1 h e então submetidos ao ensaio de resistência à tração.

A resistência à tração retida por umidade induzida é dada pela expressão 21:

$$RRT = \frac{RTu}{RT} \quad (21)$$

Onde:

RRT – Resistência à tração retida, em %;

RTu – Resistência à tração após todo o ciclo de condicionamento, em MPa;

RT – Resistência à tração dos CP's não-condicionados.

A Figura 37 mostra o procedimento adotado para a realização do ensaio Lottman.

Figura 37 – Realização do ensaio Lottman.



(a) Saturação dos CP's em câmara a vácuo.

(b) CP's envoltos em filme e sacos plásticos.



(c) CP's após congelamento.



(d) CP's em banho-maria a 60°C.

(e) CP's em banho em temperatura de 25°C.

Fonte: Autora (2017).

4 RESULTADOS

Neste tópico são apresentados os resultados encontrados através dos ensaios realizados no LSP, descritos anteriormente. São também mostrados resultados com utilização de outros materiais na mistura obtidos em teses anteriores como forma de comparação ao presente estudo.

4.1 Granulometria dos Agregados

A granulometria influencia em várias características do pavimento, entre elas: estabilidade, rigidez, durabilidade, permeabilidade, trabalhabilidade e resistência à fadiga. Com o resultado do ensaio de granulometria, é possível realizar o enquadramento da mistura de SMA de acordo com a AASHTO MP8-01 (apud DER PARANÁ, 2008). Os resultados encontrados para a granulometria estão dispostos nas Tabelas 9 e 10.

Tabela 9 – Resultados dos pesos retidos acumulados obtidos nos ensaios de granulometria.

Nº #	Peneira (mm)	PESO RETIDO ACUMULADO (g)				
		B1	B0	Pó de B.	AREIA	FÍLER
2"	50,8	0	0	0	0	0
1 ½"	37,5	0	0	0	0	0
1"	25	0	0	0	0	0
¾"	19	109,3	0	0	0	0
½"	12,5	2277,6	21,2	0	0	0
⅜"	9,5	2938,8	358,3	0	0	0
Nº 4	4,75	3066,0	1763,8	16,2	0	0
Nº 8	2,36	3066,0	1985,6	391,9	3,9	0
Nº 16	1,18	3066,0	2005,8	685,6	20,6	0
Nº 30	0,60	3066,0	2016,6	865,0	77,2	0
Nº 50	0,30	3066,0	2040,4	1021,1	460,8	0,1
Nº 200	0,075	3070,0	2097,5	1285,1	1339,1	1,83
FUNDO	-	3070,6	2104,2	1346,8	1369,0	200,35
AMOSTRA	-	3071,4	2111,5	1350,5	1369,3	200,7

Fonte: Autora (2017).

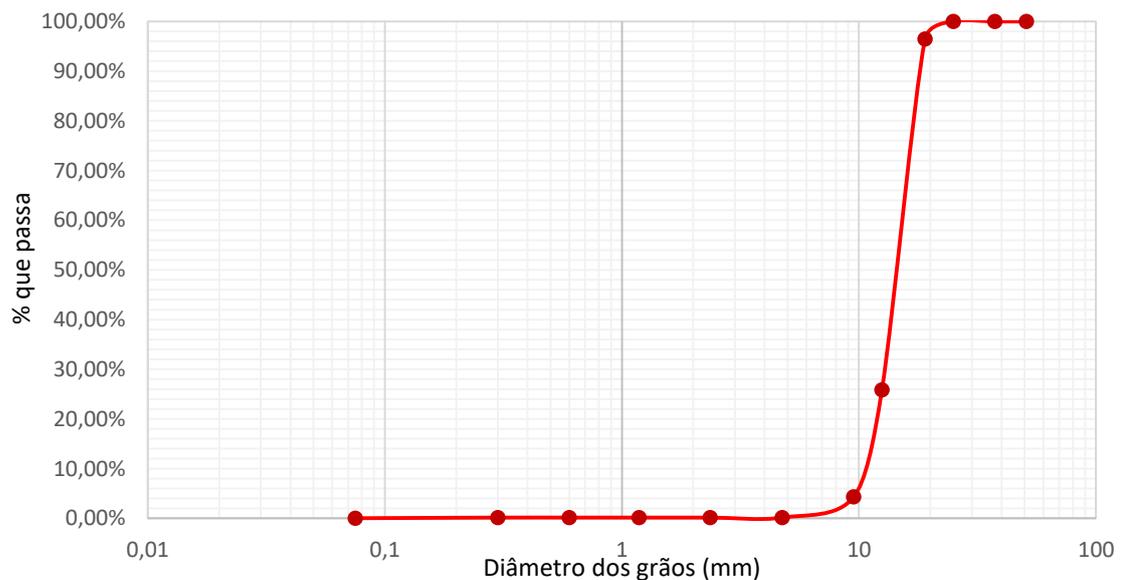
Tabela 10 – Resultados dos ensaios de granulometria dos agregados.

Nº #	Peneira (mm)	% QUE PASSA				
		B1	B0	Pó de B.	AREIA	FÍLER
2"	50,8	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%
1 ½"	37,5	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%
1"	25	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%
¾"	19	96,44%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%
½"	12,5	25,83%	98,99%	100,00%	100,00%	100,00%
⅜"	9,5	4,29%	82,97%	100,00%	100,00%	100,00%
Nº 4	4,75	0,15%	16,18%	98,90%	100,00%	100,00%
Nº 8	2,36	0,15%	5,64%	70,90%	99,72%	100,00%
Nº 16	1,18	0,15%	4,68%	49,09%	98,50%	100,00%
Nº 30	0,60	0,15%	4,16%	35,77%	94,36%	100,00%
Nº 50	0,30	0,15%	3,03%	24,18%	66,34%	99,95%
Nº 200	0,075	0,02%	0,32%	4,58%	2,18%	99,09%

Fonte: Autora (2017).

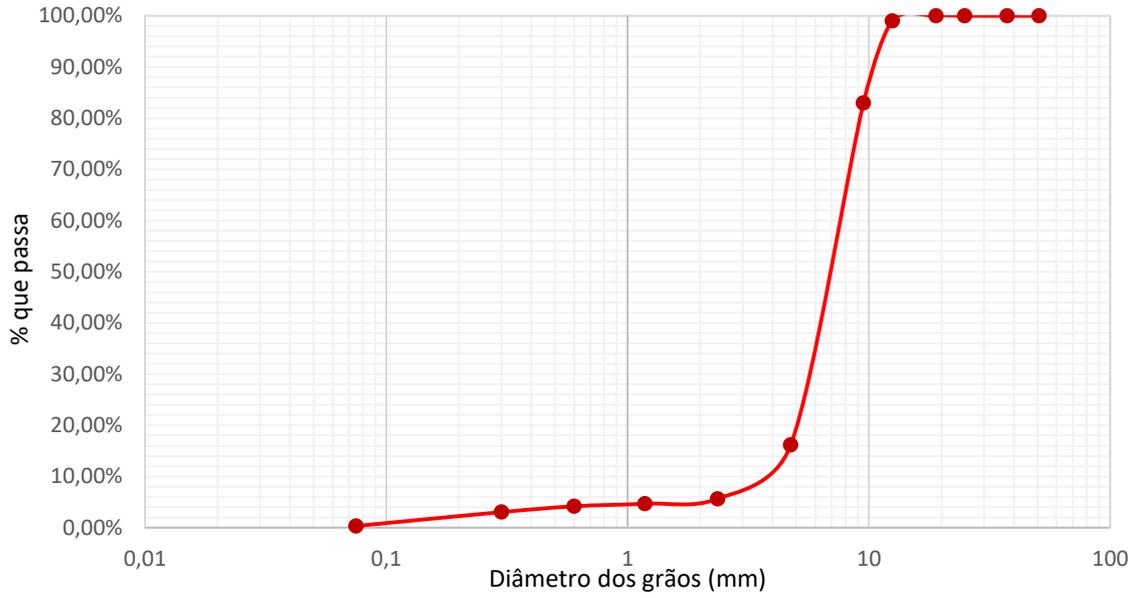
Os Gráficos 1 a 5 apresentam as curvas granulométricas dos materiais ensaiados, relacionando-se o diâmetro dos grãos com a porcentagem de material que passa em cada peneira, mostrados na Tabela 10.

Gráfico 1 – Curva granulométrica da brita 1.



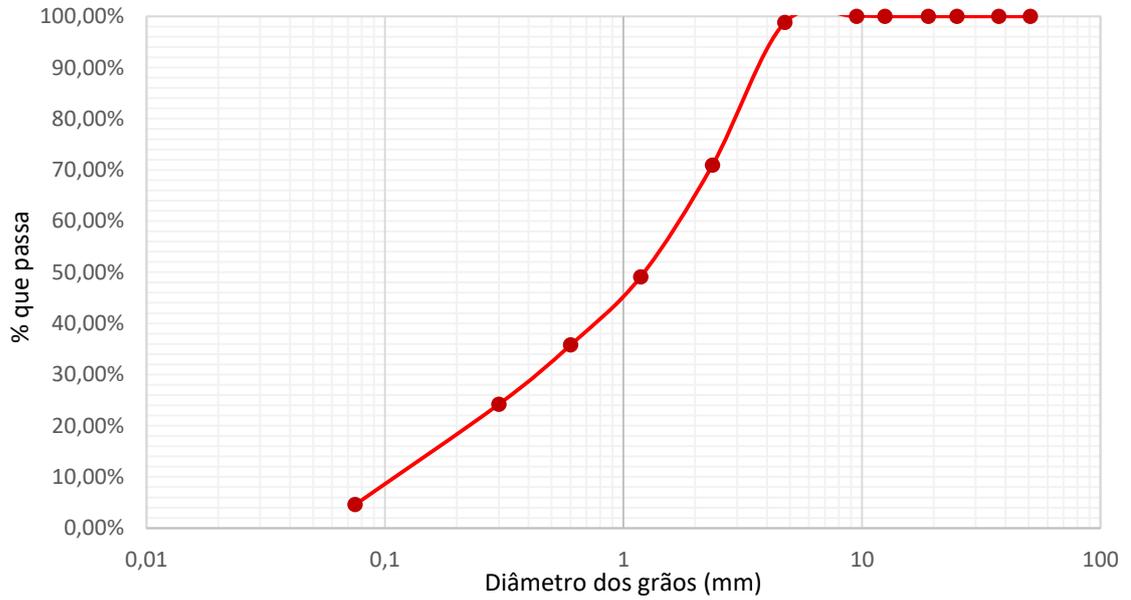
Fonte: Autora (2017).

Gráfico 2 – Curva granulométrica da brita 0.



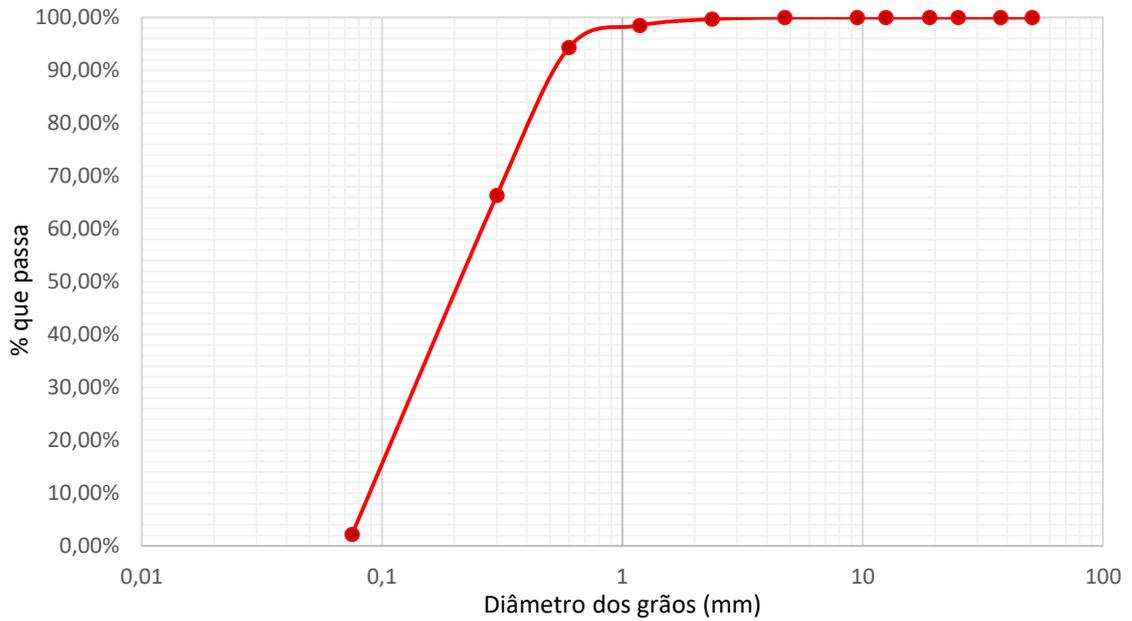
Fonte: Autora (2017).

Gráfico 3 – Curva granulométrica do pó de brita.



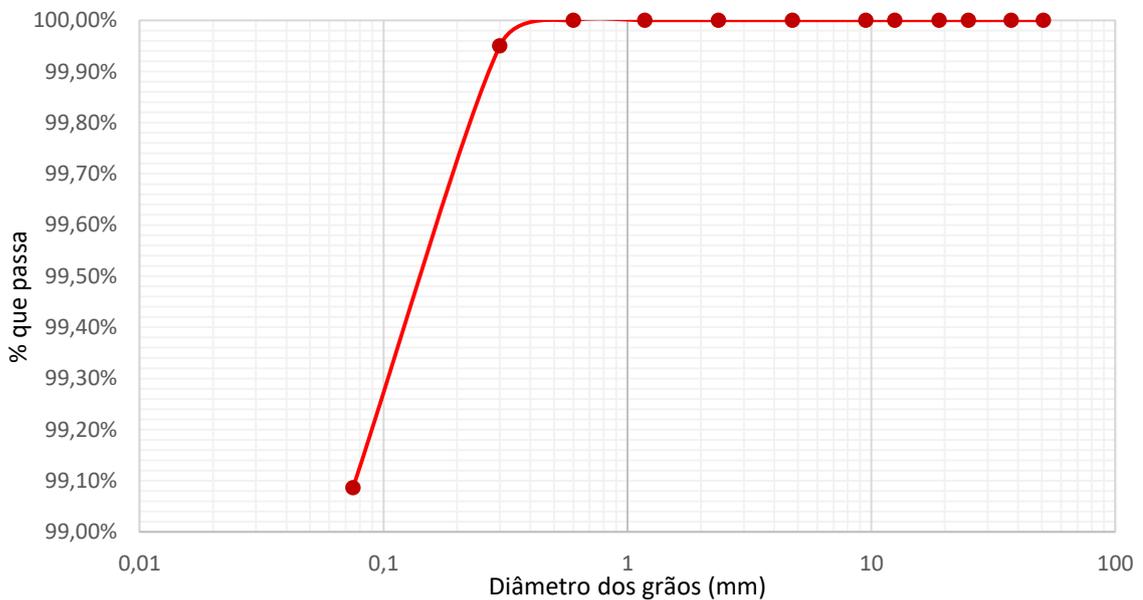
Fonte: Autora (2017).

Gráfico 4 – Curva granulométrica da areia.



Fonte: Autora (2017).

Gráfico 5 – Curva granulométrica do fíler.



Fonte: Autora (2017).

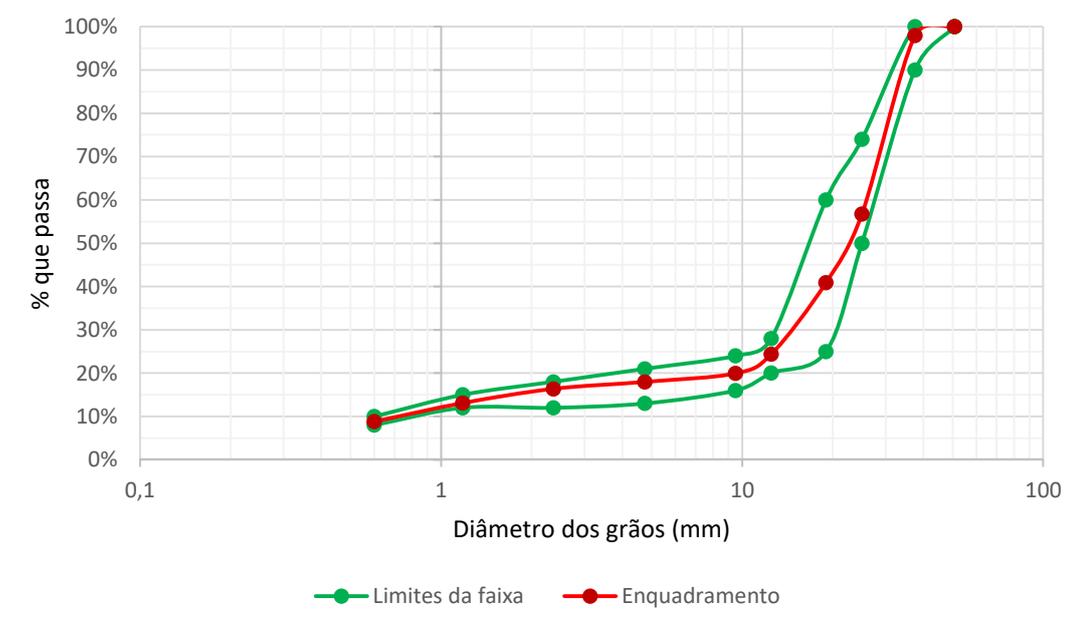
O enquadramento granulométrico foi realizado para definir a porcentagem de cada material na mistura. Foi executado conforme a AASHTO MP8-01 (apud DER PARANÁ, 2008), respeitando os limites definidos para a faixa escolhida, de 19 mm, mostrada na Tabela 2 do presente estudo. O traço proposto encontrado (Tabela 11), assim como sua curva granulométrica (Gráfico 6), são apresentados a seguir.

Tabela 11 – Enquadramento granulométrico segundo a AASHTO MP8-01 para a faixa de 19 mm.

Nº #	PEN. (MM)	% QUE PASSA					FAIXA		LIMITE MÉDIO	MIST
		B1	B0	PÓ DE BRITA	AREIA	FÍLER	LIMITES DA FAIXA			
2"	50,8	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	-	-	-	-
1 ½"	37,5	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100%	100%	100%	100%
1"	25	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100%	100%	100%	100%
¾"	19	96,44%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	90%	100%	95%	98%
½"	12,5	25,83%	98,99%	100,00%	100,00%	100,00%	50%	74%	62%	58%
⅜"	9,5	4,29%	82,97%	100,00%	100,00%	100,00%	25%	60%	43%	42%
Nº 4	4,75	0,15%	16,18%	98,80%	100,00%	100,00%	20%	28%	24%	26%
Nº 8	2,36	0,15%	5,64%	70,90%	99,72%	100,00%	16%	24%	20%	21%
Nº 16	1,18	0,15%	4,68%	49,09%	98,50%	100,00%	13%	21%	17%	19%
Nº 30	0,6	0,15%	4,16%	35,77%	94,36%	100,00%	12%	18%	15%	17%
Nº 50	0,3	0,15%	3,03%	24,18%	66,34%	99,95%	12%	15%	14%	14%
Nº 200	0,075	0,02%	0,32%	4,58%	2,18%	99,09%	8%	10%	9%	9%
TRAÇO		58,00%	21,00%	8,00%	5,00%	8,00%				

Fonte: Autora (2017).

Gráfico 6 – Curva granulométrica da mistura.



Fonte: Autora (2017).

4.2 Índice de Forma

O resultado desse ensaio indica o formato do agregado, importante para a estabilidade da mistura asfáltica. Agregados lamelares são facilmente quebrados pela ação do tráfego, podendo acelerar o aparecimento de defeitos no pavimento. Agregados cúbicos tendem a desenvolver maior atrito interno e melhor adesividade, sendo mais recomendado para a pavimentação. Os resultados obtidos neste ensaio apresentaram índice de forma de 0,696, maior que 0,5, indicando agregados de forma cúbica. O resultado completo pode ser encontrado no APÊNDICE A deste trabalho.

4.3 Absorção dos Agregados Graúdos

O resultado deste ensaio se mostra importante, pois torna possível evitar o uso de agregados com alta absorção na pavimentação, o que exigiria uma quantidade maior de ligante, encarecendo a execução. A AASHTO T 85 (apud BERNUCCI *et al.*, 2006) determina o valor máximo de absorção de 2%. Os valores de absorção encontrados estão dispostos na Tabela 12 e apresentam resultados satisfatórios para o uso na pavimentação.

Tabela 12 – Absorção dos Agregados.

	Brita 1	Brita 0
Ms (g)	1001,0	938,5
Mh (g)	1003,1	941,2
Absorção (%)	0,210	0,287

Fonte: Autora (2017).

4.4 Resistência à Abrasão

uma velocidade de 30 rpm a 33 rpm. O resultado obtido está disposto na Tabela 13 e apresenta valores de abrasão menores que 30%, ideais para o uso na pavimentação.

Tabela 13 – Abrasão "Los Angeles".

	Brita 1	Brita 0
Graduação	B	C
Rotações	500	500
M (g)	4999,7	4994,8

4.6 Adesividade a Ligante Betuminoso

O resultado do ensaio é obtido de forma visual (Figura 38). Após o período de 72 horas verificou-se o deslocamento da película de ligante betuminoso sobre o agregado. Dessa forma, a adesividade do agregado é dada como insatisfatória.

Figura 38 – Adesividade a ligante betuminoso após 72 horas.



Fonte: Autora (2017).

4.7 Angularidade

A angularidade do agregado está relacionada ao intertravamento das partículas. Agregados com maior angularidade promovem um maior atrito interno, formando uma estrutura granular mais rígida e proporcionando estabilidade da mistura. A angularidade do agregado miúdo influencia ainda na resistência à deformação permanente.

As densidades dos materiais ensaiados foram determinadas novamente pelo método do picnômetro por este ser mais preciso. A média dos resultados encontrados estão apresentados na Tabela 15.

Tabela 15 – Resultados do ensaio de angularidade dos agregados finos.

	V (cm ³)	W (g)	c (g)	Dr (g/cm ³)	U (%)
Areia	100,58	346,59	189,24	2,621	40,51%
Pó de brita	100,58	324,43	189,24	2,643	49,15%

Fonte: Autora (2017).

A angularidade mínima permitida para mistura asfáltica do tipo SMA é de 45%. Dessa forma, apenas o pó de brita se encontra em condições de uso para a pavimentação. Os resultados completos deste ensaio podem ser encontrados no APÊNDICE B deste trabalho.

4.8 Massa Específica

As médias dos resultados de massa específica dos materiais, obtidos através dos diferentes ensaios descritos, estão dispostos na Tabela 16. A massa específica do CAP 50/70 foi informada pelo fornecedor, não necessitando de ensaios. As leituras completas estão disponíveis no APÊNDICE C.

Tabela 16 – Massa específica dos materiais.

MASSA ESPECÍFICA (g/cm³)	
CAP 50/70	1,030
DNER-ME 081/98	
BRITA 1	2,758
BRITA 0	2,733
Frasco Chapman	
AREIA	2,646
PÓ DE BRITA	2,734
Frasco Le Chatelier	
FÍLER	3,077
Picnômetro	
FIBRAS	1,343

Fonte: Autora (2017).

4.9 Ensaio de Penetração

Os resultados encontrados no ensaio de penetração estão dispostos na Tabela 17. De acordo com a norma DNIT-ME 155/2010, os valores encontrados são satisfatórios para a pavimentação, já que estão localizados entre os limites de 50 e 70, além de não apresentarem variação maior que 4 décimos de milímetro entre as penetrações máxima e mínima.

Tabela 17 – Resultados do ensaio de penetração.

	P1	P2	P3
Li (0,1 mm)	230	287	339
Lf (0,1 mm)	286	339	391
P (0,1 mm)	56	52	52

PENETRAÇÃO

Tabela 19 – Resultados do ensaio de escorrimento para escolha do tratamento dado à fibra.

Peneira	Peso total (g)	Peso retido (g)	Escorrimento
Nº16	978,7	2,1	0,214%

Nº16

0,9% de fibras e 75 golpes. Apesar dos resultados insatisfatórios encontrados para a areia, este material foi utilizado. Os resultados encontrados são mostrados nas Tabela 21 a 23.

Tabela 21 – Resultados dos parâmetros para os teores de 6% de CAP e 0,9% de fibras.

CP (6,0%)	d_{ap} (g/cm³)	V_v (%)	VCB (%)	VAM (%)	RBV (%)
1	2,408	3,33	14,04	17,37	80,82
2	2,378	4,54	13,86	18,40	75,33
3	2,385	4,26	13,86	18,12	75,66
MÉDIA	2,390	4,08	13,92	18,00	77,41

DMT

O volume de vazios para misturas asfálticas do tipo SMA deve ser 4,0%. Sendo assim, o teor ótimo de ligante para a mistura foi encontrado em 6,0%, pois apresentou um volume de vazios muito próximo ao ideal, conforme apresentado na Tabela 21.

Embora os valores encontrados para os parâmetros atendam aos requisitos para o SMA, os resultados de estabilidade se mostraram insatisfatórios, já que não atingiram o mínimo de 632 kgf. Quanto à resistência à tração, os resultados se mostraram satisfatórios, pois ultrapassaram 0,6 MPa. Os resultados da estabilidade, fluência e resistência à tração são mostrados na Tabela 24.

Tabela 24 – Resultados da estabilidade e resistência à tração para o teor de 0,9% de fibras.

Teor	ES (kgf)	Fluência (mm)	RT (MPa)
6,0%	474,51	3,69	0,8958
6,5%	467,72	3,44	0,9146
7,0%	367,18	4,12	0,9085

Fonte: Autora (2017).

A deficiência na estabilidade da mistura asfáltica pode estar relacionada à baixa angularidade da areia utilizada. Porém, procurou-se avaliar a influência das fibras de cana-de-açúcar nos parâmetros e na estabilidade do revestimento estudado. O ensaio foi feito para os teores de 2% e 3% de fibras e de 6,0% de CAP. Os resultados encontrados estão dispostos nas Tabelas 25 e 26.

Tabela 25 – Resultados dos parâmetros para o teor de 2% de fibras.

CP (2%)	d_{ap} (g/cm³)	V_v (%)	VCB (%)	VAM (%)	RBV (%)
1	2,344	4,93	13,65	18,58	73,49
2	2,355	4,49	13,71	18,21	75,34
3	2,357	4,41	13,73	18,14	75,34
MÉDIA	2,342	4,61	13,70	18,31	74,84

DMT

Tabela 26 – Resultados dos parâmetros para o teor de 3% de fibras.

CP (3%)	d_{ap} (g/cm³)	V_v (%)	VCB (%)	VAM (%)	RBV (%)
1	2,20	5,44	13,46	18,90	71,20
2	2,211	6,01	13,37	19,38	69,00
3	2,297	5,98	13,38	19,36	69,12
MÉDIA	2,235	5,81	13,40	19,21	69,77

DMT

Tabela 28 – Granulometria da areia proveniente do pó de brita.

Nº #	Peneira (mm)	% QUE PASSA
		Areia de Pó de Brita
2"	50,8	100,00%
1 ½"	37,5	100,00%
1"	25	100,00%
¾"	19	100,00%
½"	12,5	100,00%
⅜"	9,5	100,00%
Nº 4	4,75	100,00%
Nº 8	2,36	100,00%
Nº 16	1,18	75,12%
Nº 30	0,60	51,79%
Nº 50	0,30	36,19%
Nº 200	0,075	13,95%

Fonte: Autora (2017).

De acordo com a granulometria encontrada, o traço anterior pode continuar a ser utilizado. Foram, então, moldados três CP's com o teor de fibras de 0,9% e três com o teor de 1,5% utilizando-se a areia proveniente do pó de brita, a fim de comparar os parâmetros volumétricos e as estabilidades (Tabela 29).

Tabela 29 – Comparação dos parâmetros para 75 golpes.

CP (75 golpes)	Vv (%)	VCB (%)	VAM	RBV (%)	H (mm)	ES (kgf)
0,9%	4,18	13,93	18,11	77,08	65,63	632,042
1,5%	3,89	13,89	17,78	78,26	65,30	700,368

Fonte: Autora (2017).

Observando os resultados, percebe-se que a estabilidade da mistura asfáltica foi altamente influenciada pela angularidade do agregado miúdo, passando a atingir, em ambos os casos, a média mínima de 632 kgf exigida.

De forma a tentar comparar a quebra dos agregados graúdos na mistura, foi realizado o mesmo procedimento para uma compactação Marshall de 50 golpes (Tabela 30).

Tabela 30 – Comparação dos parâmetros para 50 golpes.

CP (50 golpes)	Vv (%)	VCB (%)	VAM	RBV (%)	H (mm)	ES (kgf)
0,9%	4,37	13,90	18,27	76,22	66,46	634,748
1,5%	4,03	13,87	17,90	77,48	67,11	667,558

Fonte: Autora (2017).

Nota-se que com a diminuição do número de golpes há aumento do volume de vazios, do VAM e da altura. Isso se deve à menor quebra dos agregados graúdos decorrente da compactação. A fim de verificar a quebra dos agregados durante o processo de compactação, foi realizada a comparação das granulometrias antes e depois da compactação Marshall através do aparelho Rotarex. As amostras utilizadas continham teores de 6% de CAP e 0,9% de fibras. Os resultados encontrados estão dispostos na Tabela 31.

Tabela 31 - Granulometria dos agregados após o processo de compactação Marshall.

Nº #	Peneira (mm)	LIMITES		Enquadramento	% QUE PASSA	
		Inferior	Superior		50 golpes	75 golpes
2"	50,8	-	-	100,00%	100,00%	100,00%
1 1/2"	37,5	-	-	100,00%	100,00%	100,00%
1"	25	100%	100%	100,00%	100,00%	100,00%
3/4"	19	90%	100%	98,00%	100,00%	100,00%
1/2"	12,5	50%	74%	57,00%	59,02%	71,39%
3/8"	9,5	25%	60%	41,00%	40,93%	53,52%
Nº 4	4,75	20%	28%	24,00%	25,41%	29,65%
Nº 8	2,36	16%	24%	20,00%	19,14%	23,20%
Nº 16	1,18	13%	21%	17,00%	15,16%	20,79%
Nº 30	0,60	12%	18%	15,00%	10,92%	13,80%
Nº 50	0,30	12%	15%	13,00%	8,91%	11,08%
Nº 200	0,075	8%	10%	9,00%	3,70%	2,20%
AMOSTRA (g)					414,80	612,6
PERCENTUAL DE LIGANTE					5,52	5,70

Fonte: Autora (2017).

De acordo com os resultados obtidos, os corpos de prova compactados com apenas 50 golpes atingiram uma granulometria mais próxima ao enquadramento encontrado, estando

fora dos limites da faixa apenas nas peneiras de malha nº 50 e nº 200, o que pode ter sido ocasionado pelo processo de centrifugação, já que há possibilidade de perda de finos durante a extração do betume.

A granulometria para 75 golpes apresenta maior passagem dos grãos nas peneiras de malha de maior abertura, o que indica a quebra dos grãos ocorrida no processo de compactação. Apesar da quebra ocorrida, a granulometria ainda se encontra dentro dos limites da faixa escolhida para o SMA, exceto na peneira de nº 4, em que a faixa permitida é 20-28%, e nas peneiras de nº 50 e nº 200, que pode ser justificada pela possibilidade de perda de finos durante o ensaio.

Dessa forma, em busca de melhor desempenho para a mistura estudada, optou-se pela porcentagem de 1,5% de fibras e 50 golpes para a realização da dosagem Marshall. Foram escolhidos os teores de CAP de 5,5% (Tabela 32), 6,0% (Tabela 33) e 6,5% (Tabela 34).

Tabela 32 – Resultados da dosagem Marshall para os teores de 5,5% de CAP e 1,5% de fibras.

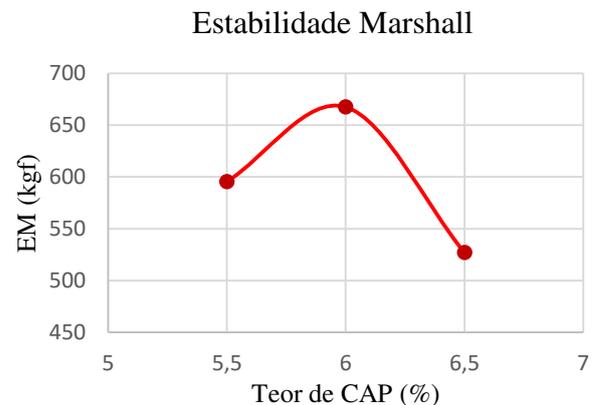
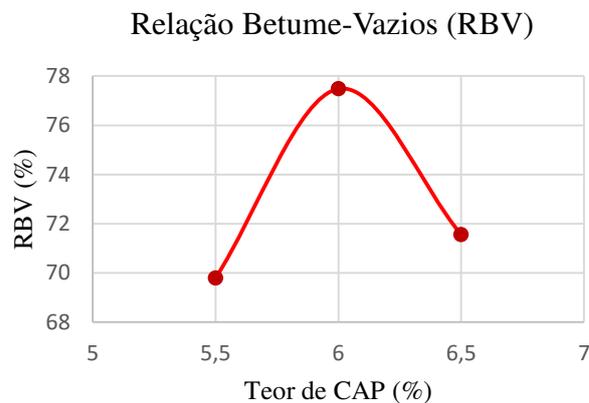
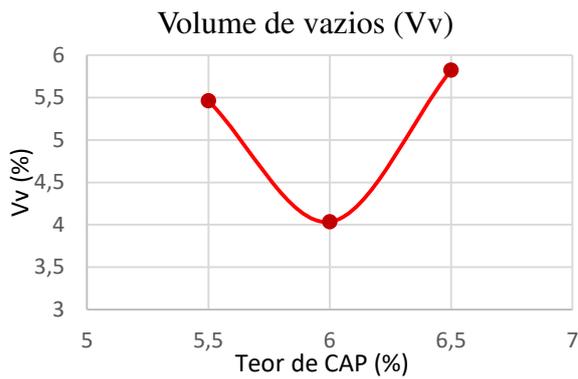
CP (5,5%)	d_{ap} (g/cm³)	V_v (%)	VCB (%)	VAM (%)	RBV (%)
1	2,367	5,31	12,64	17,95	70,44
2	2,361	5,57	12,61	18,17	69,37
3	2,362	5,52	12,61	18,13	69,57
MÉDIA	2,363	5,46	12,62	18,08	69,79

DMT

Tabela 34 – Resultados da dosagem Marshall para os teores de 6,5% de CAP e 1,5% de fibras.

CP (6,5%)	d_{ap} (g/cm³)	V_v (%)	VCB (%)	VAM (%)	RBV (%)
1	2,327	5,50	14,69	20,18	72,76
2	2,307	6,29	14,56	20,86	69,82
3	2,323	5,68	14,66	20,33	72,09
MÉDIA	2,319	5,82	14,63	20,46	71,55

DMT



Fonte: Autora (2017).

De acordo com os resultados obtidos, encontrou-se 4% de volume de vazios para o teor de 6% de CAP, definido como teor ótimo de ligante para a mistura asfáltica. As tabelas e gráficos completos deste tópico podem ser encontrados no APÊNDICE E deste projeto.

4.14 Ensaio Lottman

Para a realização do ensaio Lottman, foram moldados seis corpos de prova com o teor ótimo de ligante encontrado na dosagem Marshall. Os CP's foram compactados com apenas 12 golpes, de forma a obter volume de vazios entre 6% e 8%. Os resultados obtidos no ensaio são mostrados na Tabela 36.

Tabela 36 – Resultados obtidos no ensaio Lottman.

Tabela 37 – Análise dos resultados para o teor ótimo de ligante.

Propriedade	AASHTO MP8-01	Resultados obtidos
Teor de asfalto (%)	Mín. 6,0	6,0
Volume de vazios (%)	4,0	4,03
VAM (%)	Mín. 17	17,90
RT (MPa)	0,6	0,84
RRT (%)	Mín. 70	Inconclusivo
Estabilidade (kgf)	Mín. 632	667,56
Escorrimento (%)	Máx. 0,3	0,02

Fonte: Autora (2017).

As fibras utilizadas apresentaram bom desempenho no ensaio de escorrimento, sendo necessário valores inferiores a 0,5%. Porém seu teor pode ser aumentado, já que foi verificado que seu uso pode influenciar positivamente na estabilidade da mistura.

A Tabela 38 apresenta uma comparação entre os resultados obtidos para fibras de cana-de-açúcar e resultados obtidos anteriormente em teses. Os estudos selecionados foram executados com Asfalto Modificado por Polímero e adição de celulose, Asfalto Modificado por Borracha, ambos realizados por Pazinato (2014); e fibras de coco verde e fibras de celulose, realizados por Vale (2007).

Tabela 38 – Comparação de resultados obtidos para misturas do tipo SMA.

Propriedades	Cana-de-açúcar	AMP 60/85 E + Celulose	AMB AB8	Coco Verde	Celulose
Teor de asfalto (%)	6,0	6,1	6,3	6,3	6,0
Volume de vazios (%)	4,03	4,00	4,00	4,40	3,8
VAM (%)	17,90	19,50	20,10	18,40	17,50
RBV (%)	77,48	79,50	80,20	76,10	78,20
RT (MPa)	0,84	0,83	0,79	0,76	0,67
RRT (%)	Inconclusivo	-	-	91	71
Estabilidade (kgf)	667,56	1014,4	1091,3	-	-
Fluência (mm)	4,35	3,9	3,8	-	-
Teor de fibras (%)	1,5	-	-	0,5	0,5
Escorrimento (%)	0,02	0,21	0,19	0,08	0,01

Fonte: Autora (2017).

De acordo com os valores apresentados, nota-se que os resultados encontrados com fibra de cana-de-açúcar são muito próximos dos obtidos com a fibra de celulose, chegando a alcançar uma resistência à tração significativamente mais elevada. Quanto à estabilidade, os valores para fibras de celulose não foram fornecidos na tese.

Em relação aos demais estudos, o uso de fibras de cana-de-açúcar apresentou diferença significativa apenas na estabilidade Marshall, o que pode estar relacionado com o uso de asfaltos modificados ou com a angularidade dos agregados miúdos utilizados. Além disso, a melhoria da angularidade desses agregados permitiria a diminuição do teor de fibras, uma vez que o elevado teor foi utilizado com o objetivo de aumentar a estabilidade da mistura asfáltica.

As fibras de cana-de-açúcar já foram usadas anteriormente em estudo para SMA com asfalto modificado por borracha, realizado por LEAL (2013). Os resultados encontrados estão dispostos na Tabela 39.

Tabela 39 – Resultados para SMA com fibras de cana-de-açúcar e AMB.

Propriedades	Cana-de-açúcar	AMB + Cana-de-açúcar
Teor de asfalto (%)	6,0	6,7
Volume de vazios (%)	4,03	4,0
VAM (%)	17,90	19,4
RT (MPa)	0,84	1,31
RRT (%)	Inconclusivo	97,2
Estabilidade (kgf)	667,56	1136,39
Teor de fibras (%)	1,5	0,3
Escorrimento (%)	0,02	0,02

Fonte: Autora (2017).

Através dos resultados acima, nota-se que com o uso de asfalto modificado por borracha o SMA necessita de menor teor de fibras para conter o escorrimento, permitindo o aumento do teor de ligante, além de apresentar melhoria em todos os parâmetros. Porém, esse tipo de asfalto possui elevados custos, maior dificuldade operacional e executiva, exige um maior controle de qualidade do material, além de emitir gases poluentes e nocivos à saúde humana, o que torna sua implantação algo menos viável (FORTES, 2012).

5 CONCLUSÃO

O presente trabalho teve como objetivo avaliar a possibilidade de implantação de fibras de cana-de-açúcar em misturas asfálticas do tipo SMA, analisando suas propriedades mecânicas e comparando com as especificações da norma americana AASHTO MP8-01.

Inicialmente foram realizados ensaios nos materiais a serem utilizados no estudo, de forma a verificar as propriedades requeridas por norma e a proporcionar veracidade nos resultados lidos. De forma geral, os materiais se mostraram satisfatórios para a pesquisa, porém a areia natural não atingiu os valores mínimos de equivalente de areia e de angularidade exigidos. Além disso, o ensaio de viscosidade do CAP 50/70, apesar de apresentar valores satisfatórios, encontrou resultados de temperatura de mistura elevados se comparados aos testes executados anteriormente para o mesmo ligante.

A principal função das fibras na mistura asfáltica estudada é evitar o escorrimento do ligante durante a execução do pavimento. Dessa forma, o ensaio foi realizado pelo método *Schellenberg*, para diferentes tratamentos utilizados para a fibra. O melhor desempenho foi encontrado para fibras que passam na peneira nº 16 (1,18 mm) e ficam retidas na peneira nº 30 (0,60 mm), mostrando que a grande quantidade de finos influencia negativamente na contenção do escorrimento do ligante. Além disso, foi verificada a capacidade das fibras de bagaço de cana-de-açúcar em conter o escorrimento do ligante com o teor de apenas 0,5%.

Os corpos de prova foram moldados e tiveram suas propriedades mecânicas avaliadas. Através dos resultados obtidos verificou-se que apenas a estabilidade não atingiu resultados satisfatórios, apresentando valores muito abaixo do ideal. Como a angularidade da areia não era adequada, foi utilizado o pó de brita passante na peneira de nº 8 em seu lugar.

Além disso, foi verificada a influência das fibras na estabilidade Marshall. Foram utilizados os teores de fibra de 0,9%, 2% e 3% e o teor de CAP de 6% para a análise. Os resultados mostraram melhoria na estabilidade da mistura com o aumento das fibras de cana-de-açúcar até o teor de 2%.

Foram, então, moldados CP's com 0,9% e 1,5% de fibras e substituindo a areia natural pela areia de pó de brita a fim de verificar a estabilidade. Esta apresentou resultados satisfatórios e muito superiores aos encontrados com a areia natural para ambos os teores de fibra, confirmando a influência da angularidade dos agregados miúdos na estabilidade da mistura asfáltica.

Por conter alta porcentagem de agregados graúdos, o SMA está mais suscetível a quebra de seus agregados. Assim, foram moldados CP's com 6% de CAP e 1,5% de fibras com 50 golpes e com 75 golpes a fim de verificar a granulometria após a compactação. Os CP's foram submetidos ao ensaio de extração de betume através do Rotarex e tiveram suas granulometrias comparadas ao enquadramento escolhido.

O CP produzido com 75 golpes apresentou grande diferença em relação ao enquadramento, principalmente nas peneiras de maior abertura, confirmando a quebra dos agregados durante a compactação. Apesar da diferença, ainda permaneceu entre os limites fixados da faixa, exceto pela peneira nº 4. Já o CP compactado com 50 golpes apresentou granulometria muito próxima ao enquadramento, sendo utilizado para a dosagem Marshall.

A dosagem Marshall foi realizada para os teores de 5,5%, 6,0% e 6,5% de CAP, e obteve o teor ótimo de ligante em 6,0%, encontrado para 4% de volume de vazios. Os CP's moldados para o teor ótimo apresentaram propriedades mecânicas satisfatórias segundo a AASHTO MP8-01. A fluência média encontrada para o teor ótimo foi de 4,39 mm, condizente com as demais teses encontradas sobre o SMA. Além disso, pode-se verificar que a substituição da areia por pó de brita apresentou alteração significativa apenas na estabilidade Marshall.

O ensaio Lottman foi realizado para encontrar a Resistência à Tração Retida, especificada em um valor mínimo de 70%, segundo a norma. Os resultados encontrados foram inconclusivos, uma vez que apresentaram valores distantes entre si. Sugere-se um novo ensaio utilizando-se o dope para melhorar a adesividade do ligante asfáltico de forma a adquirir resultados mais confiáveis.

De acordo com os resultados obtidos neste projeto, estima-se que um teor de fibras de bagaço de cana-de-açúcar de 0,5 – 2,0% seja ideal para a mistura asfáltica, utilizando-se maiores porcentagens apenas quando houver necessidade de aumentar a estabilidade da mistura. O uso de agregados miúdos de melhor angularidade poderia diminuir o teor de fibras.

Para trabalhos futuros, sugere-se a eliminação da areia na mistura asfáltica do tipo SMA. O pó de brita possui angularidade consideravelmente maior, o que influencia positivamente na estabilidade do revestimento asfáltico. Observando-se os limites da faixa de 19 mm da AASHTO MP8-01, nota-se a possibilidade de remoção de areia no traço e o aumento da porcentagem de pó de brita e fíler na mistura.

Neste estudo, foi verificado o aumento do volume de vazios com o aumento do teor de fibras para os CP's moldados com areia. Já para os CP's moldados com pó de brita, foi verificada a diminuição do volume de vazios com o aumento do teor de fibras. Sugere-se refazer

o procedimento de dosagem Marshall para diferentes teores de fibras, com areia e com pó de brita, a fim de comparar os resultados e melhor avaliar o comportamento das fibras de cana-de-açúcar e da angularidade dos agregados miúdos na mistura asfáltica.

Além disso, foi verificado um comportamento incomum para as curvas de volume de vazios e de relação betume-vazios encontradas na dosagem Marshall para o teor de 1,5% de fibras. O volume de vazios diminui até o teor de 6,0% de CAP e aumenta até o teor de 6,5%. Conseqüentemente, o inverso acontece com a curva de RBV. Assim, sugere-se refazer a moldagem de corpos de prova para o teor de 6,5% de CAP para avaliar os parâmetros, já que podem ter ocorrido erros de execução.

A AASHTO MP8-01 especifica que o VCA (%) deve ser menor que o VCA_{DCR} para assegurar elevado atrito interno da mistura. O VCA (%) diz respeito aos vazios entre o agregado graúdo, o que inclui todos os materiais utilizados na mistura e o volume de vazios, enquanto o VCA_{DCR} é obtido considerando apenas o volume de ar, quando somente a fração de agregado graúdo é compactada. O ensaio não foi realizado para este projeto, sendo sugerido para estudos futuros.

A durabilidade dos agregados graúdos também não foi verificada, sendo sugerida para trabalhos futuros. O ensaio verifica a resistência à desintegração dos agregados sujeitos à ação do tempo (DNER-ME 089/94). Para o SMA, é especificado uma porcentagem máxima de 15% para sulfatos de sódio e 20% aos de magnésio.

O ensaio de desgaste cântabro geralmente é realizado em misturas drenantes, como a Camada Porosa de Atrito (CPA), mas pode se estender para outros tipos de mistura. Este ensaio verifica o desgaste por abrasão sofrido por uma mistura asfáltica através da máquina “Los Angeles” (DNER-ME 383/99) e também é sugerido para trabalhos futuros. O desgaste máximo admitido é de 25% para misturas asfálticas porosas (BERNUCCI *et al.*, 2006).

Alguns parâmetros como vida de fadiga e módulo de resiliência (MR) deveriam ser analisados. A razão MR/RT permite avaliar o comportamento da mistura asfáltica em relação ao trincamento. Menores valores podem acarretar em menores espessuras de revestimento para uma mesma vida de fadiga.

A angularidade dos agregados miúdos apresentou incontestável influência na estabilidade Marshall do revestimento asfáltico em questão. Sugere-se um estudo aprofundado sobre sua influência nas diversas propriedades das misturas asfálticas, visto que não há muitos artigos sobre o tema.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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

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

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

_____. **NBR 9935**: Agregado – Terminologia. Rio de Janeiro: ABNT, 2011.

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.

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.

BALBO, J. T. **Pavimentos Asfálticos**: patologias e manutenção. 1. ed. São Paulo: Editora Plêiade, São Paulo, 1997.

BARDINI, Vivian Silveira dos Santos *et al.* **A importância do fíler para o bom desempenho das misturas asfálticas**. Escola de Engenharia de São Carlos, São Paulo, 2009.

BRASIL. Confederação Nacional de Transporte. **Pesquisa CNT de rodovias 2016**: relatório gerencial. Brasília: CNT: SEST: SENAT, 2016.

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.

BLASIUS, Luiz Carlos Brocca *et al.* **Escorrimento de Misturas Asfálticas SMA com Uso de Lã de Vidro como Aditivo Estabilizante**. Tese de graduação – Universidade do Extremo Sul Catarinense, Criciúma, Santa Catarina, 2016.

CARVALHO, Marcos Dutra de. **Pavimentação com Peças Pré-Moldadas de Concreto**. 4 ed. Associação Brasileira de Cimento Portland. São Paulo, 1998.

CERATTI, Jorge Augusto Pereira *et al.* **Utilização de ligantes asfálticos em serviços de pavimentação**. Rio de Janeiro. PETROBRAS: ABEDA, 2015.

COSTA, Wendell Lucas Silveira; BOCCHI, Maria Lígia de Melo. **Aplicações do bagaço da cana-de-açúcar utilizadas na atualidade.** Tese de graduação em Tecnologia em Biocombustíveis - Faculdade de Tecnologia de São Paulo, Jaboticabal, São Paulo, 2011.

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

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-ME 035:** Agregados – determinação da abrasão “Los Angeles”. Rio de Janeiro, DNER, 1998.

_____. **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 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 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-ME 383:** Desgaste por abrasão de misturas betuminosas com asfalto polímero – ensaio Cântabro. Rio de Janeiro, DNER, 1999.

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

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.

_____. **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.

FORTES, Rita Moura Fortes. **Asfalto borracha**: vantagens e desvantagens. Programa de pós graduação em ciência e engenharia de materiais. Universidade Federal do Amazonas, 2012.

FUNDAÇÃO DE AMPARO À PESQUISA DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO. FAPERJ. **Bagaço de cana-de-açúcar melhora o asfalto e condições ambientais**. 2010 <Disponível em: <http://www.faperj.br/?id=1648.2.0>>. Acesso em: 16 jan. 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.

GUNZI, Arnaldo. **Pavimentos de concreto e estruturas de dados**. Disponível em: <<https://ideiasesquecidas.com/2016/05/23/pavimentos-de-concreto-e-estruturas-de-dados/comment-page-1/>>. Acesso em: 14 jun. 2017.

HAGOS, Eyassu Tesfamariam. **The Effect of Aging on Binder Properties of Porous Asphalt Concrete**. Dissertação (Mestrado). Technische Universiteit Delft. Delft, 2008.

INSTITUTO DE ASFALTO, 2001, **Tradução do Manual de Asfalto**. Série do Manual n°. 4 (MS-4), Edição 1989, Instituto de Asfalto.

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.

MIRANDA, Henrique *et al.* **Análise comparativa de métodos de ensaio para avaliação do escorrimento, 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, Cláudio Luiz Dubeux. **Avaliação laboratorial de misturas asfálticas SMA produzidas com ligante asfalto-borracha.** Tese de mestrado em Engenharia Civil – Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, 2004.

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

PAZINATTO, João Antonio M. **Estudo comparativo de misturas asfálticas tipo SMA efetuadas com asfalto modificado por polímero e asfalto modificado por borracha.** Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Tecnológica do Paraná, Campo Mourão, 2014.

PEREIRA, Mirian Carvalho. **Revestimentos asfálticos:** tipos e propriedades. Tese de Conclusão de Curso – Centro Universitário de Formiga, Minas Gerais, 2014.

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

NOVACANA. **Cana-de-açúcar**

APÊNDICES

APÊNDICE A

	a	b	c	b/a	c/b		a	b	c	b/a	c/b
101	20,99	15,40	9,88	0,734	0,642	151	20,62	15,65	8,99	0,759	0,574
102	25,98	18,74	14,52	0,721	0,775	152	24,93	18,61	10,27	0,746	0,552
103	24,71	19,65	10,64	0,795	0,541	153	27,07	18,61	11,07	0,687	0,595
104	22,08	18,79	11,04	0,851	0,588	154	26,88	15,23	9,95	0,567	0,653
105	29,04	24,24	11,18	0,835	0,461	155	23,86	14,19	10,73	0,595	0,756
106	21,64	15,21	10,58	0,703	0,696	156	24,30	16,28	11,08	0,670	0,681
107	20,43	20,22	13,14	0,990	0,650	157	21,14	18,93	15,31	0,895	0,809
108	21,17	18,41	10,70	0,870	0,581	158	27,49	16,64	11,04	0,605	0,663
109	24,59	16,50	9,98	0,671	0,605	159	22,68	18,23	10,44	0,804	0,573
110	19,08	16,07	12,49	0,842	0,777	160	22,58	21,74	7,59	0,963	0,349
111	18,04	17,30	8,65	0,959	0,500	161	21,92	16,59	11,30	0,757	0,681
112	20,25	17,89	16,74	0,883	0,936	162	23,01	21,32	17,33	0,927	0,813
113	21,37	19,57	12,52	0,916	0,640	163	27,18	25,01	11,80	0,920	0,472
114	22,88	17,90	8,86	0,782	0,495	164	18,17	17,08	11,92	0,940	0,698
115	28,43	17,72	5,34	0,623	0,301	165	22,00	21,00	15,49	0,955	0,738
116	20,91	20,85	12,13	0,997	0,582	166	21,32	16,12	10,77	0,756	0,668
117	25,69	21,25	11,80	0,827	0,555	167	26,15	16,39	15,16	0,627	0,925
118	21,25	18,91	13,82	0,890	0,731	168	17,70	14,58	11,32	0,824	0,776
119	20,81	19,07	10,59	0,916	0,555	169	20,85	15,96	12,55	0,765	0,786
120	22,87	16,81	10,10	0,735	0,601	170	19,37	16,85	11,47	0,870	0,681
121	20,50	16,07	10,50	0,784	0,653	171	27,62	16,65	9,25	0,603	0,556
122	20,14	14,88	13,20	0,739	0,887	172	25,19	16,91	13,10	0,671	0,775
123	18,57	15,02	10,64	0,809	0,708	173	24,83	16,24	11,12	0,654	0,685
124	18,35	17,89	11,62	0,975	0,650	174	22,87	19,47	3,73	0,851	0,192
125	21,90	16,66	11,95	0,761	0,717	175	25,31	20,29	4,86	0,802	0,240
126	20,57	17,87	8,81	0,869	0,493	176	26,08	15,95	12,14	0,612	0,761
127	24,29	13,23	9,16	0,545	0,692	177	22,17	13,93	12,27	0,628	0,881
128	27,67	16,37	12,42	0,592	0,759	178	26,46	14,94	9,58	0,565	0,641
129	22,55	21,23	11,90	0,941	0,561	179	19,91	13,79	9,77	0,693	0,708
130	23,21	16,24	11,08	0,700	0,682	180	25,91	15,93	8,89	0,615	0,558
131	23,01	21,45	7,08	0,932	0,330	181	27,02	10,36	18,29	0,383	1,765
132	23,27	16,64	12,05	0,715	0,724	182	27,94	19,46	10,15	0,696	0,522
133	26,62	20,74	10,96	0,779	0,528	183	23,19	18,81	9,32	0,811	0,495
134	18,80	15,40	11,90	0,819	0,773	184	17,69	16,20	7,49	0,916	0,462
135	23,45	21,15	7,36	0,902	0,348	185	22,82	13,64	12,33	0,598	0,904
136	27,60	21,26	9,30	0,770	0,437	186	24,94	16,57	11,69	0,664	0,705
137	25,40	17,49	8,03	0,689	0,459	187	25,38	18,04	7,96	0,711	0,441
138	26,09	21,79	10,53	0,835	0,483	188	20,29	15,39	11,36	0,759	0,738
139	27,85	18,52	6,26	0,665	0,338	189	17,30	13,49	9,49	0,780	0,703
140	21,64	15,51	12,52	0,717	0,807	190	27,48	19,25	5,69	0,701	0,296
141	20,42	13,73	9,44	0,672	0,688	191	35,27	19,82	10,74	0,562	0,542
142	19,82	19,55	11,17	0,986	0,571	192	25,57	19,64	15,12	0,768	0,770
143	27,52	16,47	12,62	0,598	0,766	193	25,46	22,81	12,46	0,896	0,546
144	34,43	14,5	12,88	0,421	0,888	194	27,51	16,72	12,12	0,608	0,725
145	29,06	22,28	9,94	0,767	0,446	195	27,41	18,74	14,85	0,684	0,792
146	23,29	17,12	7,08	0,735	0,414	196	39,64	17,86	12,12	0,451	0,679
147	21,48	18,99	12,32	0,884	0,649	197	31,46	19,22	14,42	0,611	0,750
148	17,94	16,13	11,86	0,899	0,735	198	28,82	16,43	13,03	0,570	0,793
149	19,04	16,21	10,60	0,851	0,654	199	28,71	21,79	6,78	0,759	0,311
150	19,96	15,82	6,98	0,793	0,441	200	33,21	15,31	8,68	0,461	0,567

b/a = 0,744
c/b = 0,648

APÊNDICE B

APÊNDICE C

APÉNDICE D

APÊNDICE E

Tabela 48 – Resultados do ensaio de Estabilidade Marshall para o teor de 0,9% de fibras.

CP	h1 (mm)	h2 (mm)	h3 (mm)	h4 (mm)	h (mm)	Fh	Lp	Fluência (mm)	ES (kgf)
1	67,08	65,62	65,96	66,25	66,23	0,956	491	3,72	469,61
2	67,50	67,02	67,09	67,26	67,22	0,933	457	3,06	426,59
3	66,94	67,01	67,24	67,12	67,08	0,937	563	4,29	527,33
7	64,81	65,49	66,66	64,55	65,37	0,968	467	3,05	452,06
8	67,69	67,63	67,89	67,26	67,62	0,924	480	3,51	443,52
9	65,19	65,36	65,50	65,30	65,33	0,978	519	3,76	507,58
13	65,96	65,91	65,95	65,59	65,85	0,966	384	4,02	370,94
14	71,33	71,01	69,23	71,03	70,65	0,860	299	4,69	257,14
15	67,37	65,98	63,52	65,86	60,94	1,096	432	3,66	473,47

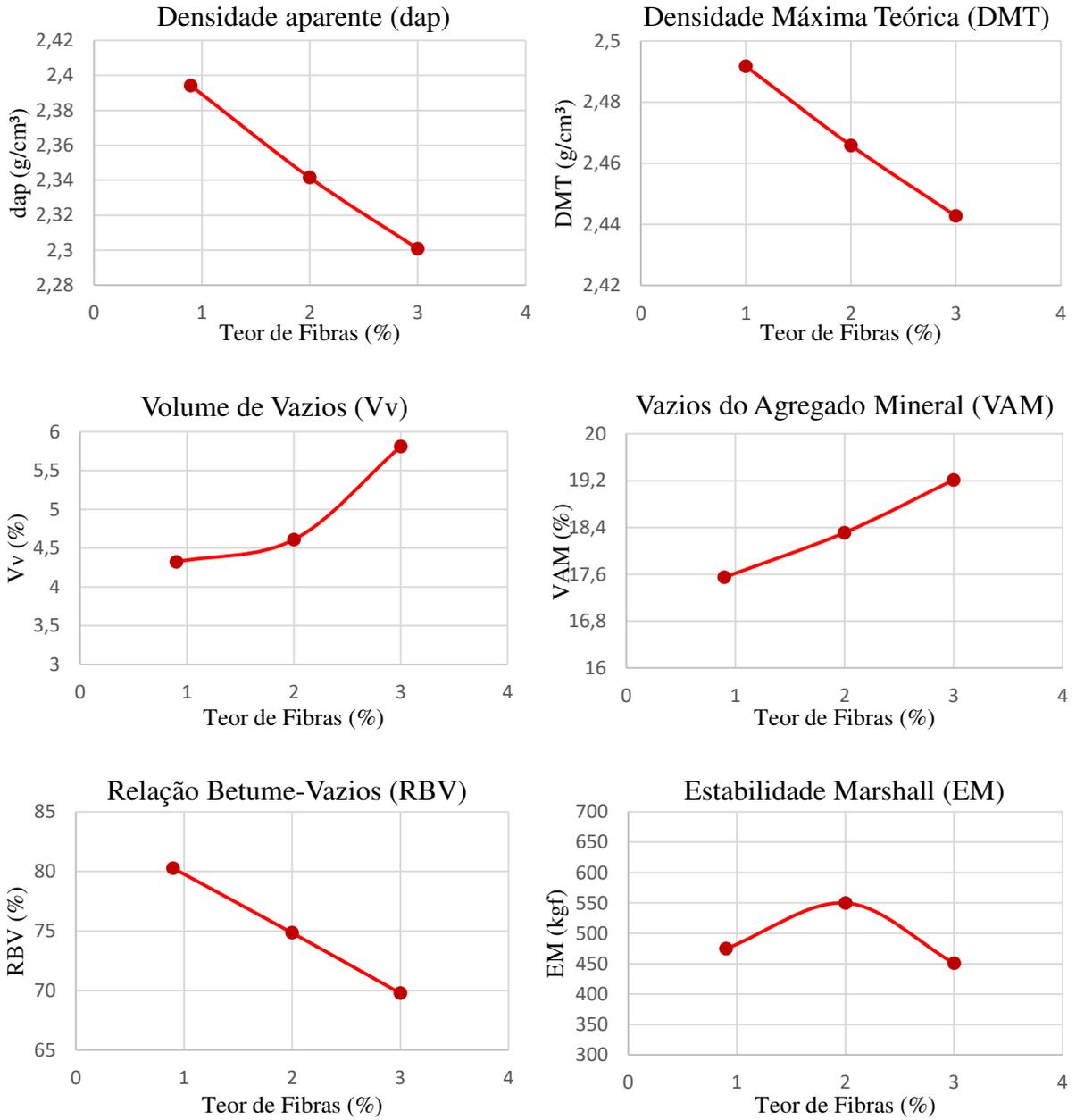
Fonte: Autora (2017).

Tabela 49 – Resultados do ensaio de resistência à tração para o teor de 0,9% de fibras.

CP	h1 (mm)	h2 (mm)	h3 (mm)	h4 (mm)	h (mm)	F (N)	RRT (Mpa)
4	66,94	67,35	66,80	67,07	67,04	9927,72	0,94
5	66,61	66,95	66,18	66,55	66,52	10035,63	0,96
6	66,68	66,18	65,67	66,20	66,18	8152,11	0,78
10	64,60	64,00	65,37	64,76	64,68	8534,70	0,84
11	65,77	66,25	63,77	66,48	65,57	9339,12	0,91
12	64,68	65,23	65,07	64,04	64,76	10143,54	0,99
16	60,00	62,35	61,60	59,82	65,68	9211,59	0,89
17	63,22	62,32	62,59	61,16	62,32	9564,75	0,98
18	61,85	62,45	61,89	60,78	61,74	8299,26	0,86

Fonte: Autora (2017).

Gráfico 10 – Parâmetros determinados na dosagem Marshall para diferentes teores de fibra e 6% de CAP.



Fonte: Autora (2017).

Tabela 50 – Resultados para a dosagem Marshall com os teores de 5,5% de CAP e 1,5% de fibras.

CP (5,5%)	1	2	3	4	5	6
Par (g)	1197,4	1190,1	1190,7	-	-	-
Pag (cm³)	505,8	504,1	504,4	-	-	-
dap (g/cm³)	2,367	2,362	2,360	-	-	-
Vv (%)	5,31	5,49	5,57	-	-	-
VCB (%)	12,64	12,62	12,61	-	-	-
VAM (%)	17,95	18,11	18,18	-	-	-
RBV (%)	70,44	69,68	69,34	-	-	-
D (cm)	10	10	10	10	10	10
H1 (mm)	66,13	65,12	68,44	66,21	67,74	66,07
H2 (mm)	67,61	66,89	67,62	65,23	66,81	67,74
H3 (mm)	68,18	67,92	67,32	66,84	67,31	68,28
H4 (mm)	67,93	65,55	67,75	66,35	67,25	67,58
H (mm)	67,46	66,37	67,78	66,16	67,28	67,42
Fh	0,928	0,953	0,921	-	-	-
Fp	2,0154	2,0154	2,0154	2,0154	2,0154	2,0154
Lp	320	319	310	-	-	-
ES (kgf)	598,46	612,78	575,28	-	-	-
F (N)	-	-	-	430	417	440
RT (MPa)				0,82	0,78	0,82

Fonte: Autora (2017).

Tabela 51 – Resultados para a dosagem Marshall com os teores de 6,0% de CAP e 1,5% de fibras.

CP (6,0%)	1	2	3	4	5	6
Par (g)	1221,9	1229,6	1228,7	-	-	-
Pag (cm³)	512,0	518,4	515,3	-	-	-
dap (g/cm³)	2,387	2,372	2,384	-	-	-
Vv (%)	3,81	4,40	3,89	-	-	-
VCB (%)	13,90	13,82	13,89	-	-	-
VAM (%)	17,71	18,22	17,78	-	-	-
RBV (%)	78,49	75,85	78,1	-	-	-
D (cm)	10	10	10	10	10	10
H1 (mm)	66,20	67,53	67,40	67,45	66,78	68,48
H2 (mm)	66,49	67,65	65,69	67,10	67,59	68,22
H3 (mm)	67,24	68,33	67,20	65,76	64,82	69,39
H4 (mm)	66,70	67,43	67,48	66,90	66,87	69,26
H (mm)	66,66	67,74	66,94	66,80	66,52	68,84
Fh	0,946	0,922	0,940	-	-	-
Fp	2,0154	2,0154	2,0154	2,0154	2,0154	2,0154
Lp	410	290	360	-	-	-
ES (kgf)	782,02	538,78	681,87	-	-	-
F (N)	-	-	-	470	428	450
RT (MPa)	-	-	-	0,89	0,81	0,82

Fonte: Autora (2017).

Tabela 52 – Resultados para a dosagem Marshall com os teores de 6,5% de CAP e 1,5% de fibras.

CP (6,5%)	1	2	3	4	5	6
Par (g)	1188,4	1191,1	1195,7	-	-	-
Pag (cm³)	510,7	516,2	514,8	-	-	-
dap (g/cm³)	2,327	2,307	2,323	-	-	-
Vv (%)	5,50	6,29	5,68	-	-	-
VCB (%)	14,69	14,56	14,66	-	-	-
VAM (%)	20,18	20,86	20,33	-	-	-
RBV (%)	72,76	69,82	72,09	-	-	-
D (cm)	10	10	10	10	10	10
H1 (mm)	67,20	68,28	67,91	68,87	66,96	69,13
H2 (mm)	67,13	67,91	68,07	69,20	66,95	70,38
H3 (mm)	65,52	66,86	68,16	68,68	67,07	70,15
H4 (mm)	66,49	66,19	67,51	68,76	67,36	70,06
H (mm)	66,59	67,31	67,91	68,88	67,09	69,93
Fh	0,948	0,931	0,918	-	-	-
Fp	2,0154	2,0154	2,0154	2,0154	2,0154	2,0154
Lp	310	290	240	-	-	-
ES (kgf)	592,34	544,37	443,98	-	-	-
F (N)	-	-	-	500	550	430
RT (MPa)	-	-	-	0,91	1,03	0,77

Fonte: Autora (2017).