

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E
TECNOLOGIA DE GOIÁS – CAMPUS GOIÂNIA
DEPARTAMENTO DE ÁREAS ACADÊMICAS III
CURSO BACHARELADO EM ENGENHARIA DE
TRANSPORTES

**Estudo do desempenho de uma mistura asfáltica
SMA com adição de bagaço de cana-de-açúcar**

**Carina Catani Batista do Nascimento
Jéssika Rodrigues de Sousa**

GOIÂNIA
NOVEMBRO DE 2018

Carina Catani Batista do Nascimento
Jéssika Rodrigues de Sousa

Estudo do desempenho de uma mistura asfáltica SMA com adição de bagaço de cana-de-açúcar

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Coordenação do Curso de Engenharia de Transportes do Departamento de Áreas Acadêmicas III, do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás - Campus Goiânia, como requisito parcial para obtenção do título de bacharel em Engenharia de Transportes.

Orientador: Prof. Dr. João Carlos de Oliveira

GOIÂNIA
NOVEMBRO DE 2018

N17e Nascimento, Carina Catani Batista do.

Estudo do desempenho de uma mistura asfáltica SMA com adição de bagaço de cana-de-açúcar / Carina Catani Batista do Nascimento; Jéssika Rodrigues de Sousa. – Goiânia: Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, 2018.

78 f.: il.

Orientador: Prof. João Carlos de Oliveira.

TCC (Trabalho de Conclusão de Curso) – Curso de Bacharelado em Engenharia de Transportes, Departamento de Áreas Acadêmicas III, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás.

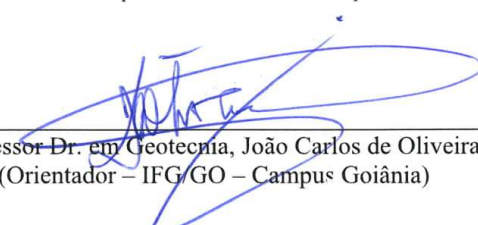
1. Pavimentos asfálticos. 2. Mistura asfáltica - SMA. 3. Cana-de-açúcar. I. Sousa, Jéssika Rodrigues de. II. Oliveira, João Carlos de (orientador). III. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás. IV. Título.

CDD 625.8

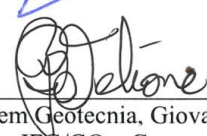
Carina Catani Batista do Nascimento
Jéssika Rodrigues de Sousa

Estudo do desempenho de uma mistura asfáltica SMA com adição de bagaço de cana-
de-açúcar

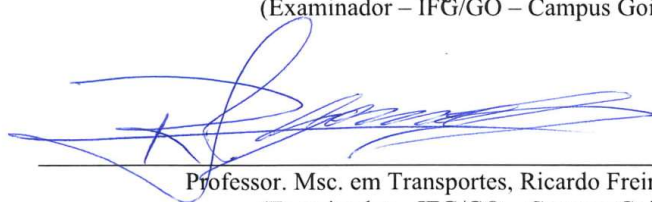
TCC defendido e aprovado no dia 28 de Novembro de
2018 pela banca constituída pelos senhores:



Professor Dr. em Geotecnia, João Carlos de Oliveira
(Orientador – IFG/GO – Campus Goiânia)



Professor. Msc. em Geotecnia, Giovane Batalione
(Examinador – IFG/GO – Campus Goiânia)



Professor. Msc. em Transportes, Ricardo Freire Gonçalves
(Examinador – IFG/GO – Campus Goiânia)

GOIÂNIA
NOVEMBRO DE 2018



INSTITUTO FEDERAL
Goiás

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
SISTEMA INTEGRADO DE BIBLIOTECAS

TERMO DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAÇÃO NO REPOSITÓRIO DIGITAL DO IFG - ReDi IFG

Com base no disposto na Lei Federal nº 9.610/98, AUTORIZO o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, a disponibilizar gratuitamente o documento no Repositório Digital (ReDi IFG), sem ressarcimento de direitos autorais, conforme permissão assinada abaixo, em formato digital para fins de leitura, download e impressão, a título de divulgação da produção técnico-científica no IFG.

Identificação da Produção Técnico-Científica

- | | |
|--|---|
| ☐ Tese | ☐ Artigo Científico |
| ☐ Dissertação | ☐ Capítulo de Livro |
| ☐ Monografia – Especialização | ☐ Livro |
| ☒ TCC – Graduação | ☐ Trabalho Apresentado em Evento |
| ☐ Produto Técnico e Educacional - Tipo: _____ | |

Nome Completo do Autor: Carina Latoni Batista de Nascimento - física teórica de base

Matrícula: 20151041180277 e 20142011080148

Título do Trabalho: Estudo de dimensão de uma mistura espalhada SNA com adição de borcu de água - aplicação

Restrições de Acesso ao Documento

Documento confidencial: ☒ Não ☐ Sim, justifique: _____

Informe a data que poderá ser disponibilizado no ReDi/IFG: 12/12/18

O documento está sujeito a registro de patente? ☐ Sim ☒ Não

O documento pode vir a ser publicado como livro? ☒ Sim ☐ Não

DECLARAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO NÃO-EXCLUSIVA

O/A referido/a autor/a declara que:

- o documento é seu trabalho original, detém os direitos autorais da produção técnico-científica e não infringe os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade;
- obteve autorização de quaisquer materiais incluídos no documento do qual não detém os direitos de autor/a, para conceder ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás os direitos requeridos e que este material cujos direitos autorais são de terceiros, estão claramente identificados e reconhecidos no texto ou conteúdo do documento entregue;
- cumpriu quaisquer obrigações exigidas por contrato ou acordo, caso o documento entregue seja baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás.

Carina 12/12/18
Local Data

Assinatura do Autor e/ou Detentor dos Direitos Autorais:

Dedicamos este trabalho a Deus e aos nossos familiares, pelo apoio ao longo dessa jornada.

Agradecimentos

Primeiramente a Deus por ter nos dado o dom da vida e permitido que chegássemos até aqui com saúde e capacidade de realizarmos nossos sonhos.

Aos nossos pais por todo apoio ao longo desses anos. Sem vocês jamais conseguiríamos ser quem somos.

Ao nosso orientador Dr. João Carlos de Oliveira, por ter aceitado encarar este desafio. Sem a sua amizade, paciência, conhecimento e atenção para conosco, nada disso teria sido possível.

Ao professor Msc. Giovane Batalione pelo suporte e mediação e a CentroAlcool S.A pela doação do bagaço de cana-de-açúcar.

Ao grupo Disbral na pessoa do engenheiro Renato Darim pela atenção, apoio e doação do ligante asfáltico utilizado nesta pesquisa.

Ao professor MSc. Humberto Rodrigues Mariano e a Pedreira Pedra Britada pelo fornecimento dos agregados.

Aos técnicos Alfredo, Sandro e Sérgio por todo suporte oferecido durante os ensaios, horas de acompanhamento e dedicação.

Agradecemos a UFG na pessoa do técnico Clayton, pela disponibilidade de nos receber no laboratório.

Aos nossos colegas de classe, por todo apoio e amizade ao longo desses cinco anos. Orgulho em fazer parte da primeira turma de Engenharia de Transportes do Estado de Goiás.

*“Por vezes sentimos que aquilo que fazemos não
é senão uma gota de água no mar. Mas o mar
seria menor se lhe faltasse uma gota.”*

Maria Tereza de Calcutá

Lista de Figuras

FIGURA 1 - SEÇÃO TRANSVERSAL DA ESTRUTURA DO PAVIMENTO	19
FIGURA 2 - COMPOSIÇÃO ESQUEMÁTICA DO SMA	22
FIGURA 3 - COMPOSIÇÕES GRANULOMÉTRICAS COMPARATIVAS ENTRE SMA E UM CA	23
FIGURA 4 - EXEMPLO DE CURVA DE ESTABILIDADE E FLUÊNCIA MARSHALL DE UMA MISTURA ASFÁLTICA	28
FIGURA 5 - PRENSA MARSHALL	29
FIGURA 6 - TENSÃO DE TRAÇÃO UNIFORME DEVIDO À COMPRESSÃO DIAMETRAL	31
FIGURA 7 - FIBRA DE CELULOSE EM PELLET	32
FIGURA 8 - BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR	34
FIGURA 9 - FLUXOGRAMA DA METODOLOGIA	37
FIGURA 10 - ENSAIO DE RECUPERAÇÃO ELÁSTICA	44
FIGURA 11 - ENSAIO DE RESISTÊNCIA A TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL	47
FIGURA 12 - FLUXOGRAMA DA MISTURA SMA	49
FIGURA 13 - ENSAIO DE GRANULOMETRIA DO AGREGADO GRAÚDO	51
FIGURA 14 - ENSAIO DE GRANULOMETRIA DO AGREGADO MIÚDO	51
FIGURA 15 - CURVA GRANULOMÉTRICA DOS AGREGADOS	53
FIGURA 16 - EQUIPAMENTO DE ABRASÃO “LOS ANGELES”	53
FIGURA 17 - PAQUÍMETRO UTILIZADO NO ENSAIO DE ÍNDICE DE FORMA	54
FIGURA 18 - MISTURA DO LIGANTE ASFÁLTICO AO AGREGADO	55
FIGURA 19 - REPOUSO DOS AGREGADOS COM LIGANTE ASFÁLTICO	56
FIGURA 20 - MATERIAL COBERTO COM ÁGUA DESTILADA	56
FIGURA 21 - MATERIAL APÓS 72 HORAS NA ESTUFA	57
FIGURA 22 - ENSAIO DE ABSORÇÃO E DENSIDADE	58
FIGURA 23 - COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA DA MISTURA ASFÁLTICA SMA	61
FIGURA 24 - MISTURA DOS MATERIAIS PARA COMPOR O CORPO DE PROVA	62
FIGURA 25 - MISTURA SENDO ACOMODADA NO CILINDRO DE COMPACTAÇÃO	62
FIGURA 26 - CORPOS DE PROVA EM REPOUSO APÓS COMPACTAÇÃO	63
FIGURA 27 - CORPOS DE PROVA EM BANHO MARIA NA ÁGUA POR 30 MIN À 60°C	63
FIGURA 28 - CORPO DE PROVA NO MOLDE DE COMPRESSÃO ANTES DE ROMPER	64
FIGURA 29 - VOLUME DE VAZIOS EM FUNÇÃO DO TEOR DE CAP	65
FIGURA 30 - TEOR DE LIGANTE X VAZIOS DO AGREGADO MINERAL	66
FIGURA 31 - TEOR DE LIGANTE X ESTABILIDADE MARSHALL	67
FIGURA 32 - CORPO DE PROVA NO MOLDE DE COMPRESSÃO PARA DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA A TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL	67
FIGURA 33 - ENSAIO DE SENSIBILIDADE AO ESCORRIMENTO	69
FIGURA 34 - ESCORRIMENTO COM 0,3% DE BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR	69
FIGURA 35 - ESCORRIMENTO COM 0,5% DE BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR	70
FIGURA 36 - ESCORRIMENTO COM 0,7% DE BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR	70

Lista de Tabelas

TABELA 1 - COMPOSIÇÃO QUÍMICA DO BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR	34
TABELA 2 - RESUMO DOS ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS.....	42
TABELA 3 - RESUMO DOS ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DO LIGANTE ASFÁLTICO SBS 60/85	44
TABELA 4 - FAIXAS GRANULOMÉTRICAS DE SMA PELA ESPECIFICAÇÃO ALEMÃ	45
TABELA 5 - GRANULOMETRIA DO AGREGADO GRAÚDO E AGREGADO MIÚDO.....	52
TABELA 8 - DESGASTE DOS AGREGADOS POR ABRASÃO.....	54
TABELA 7 - MASSA ESPECÍFICA DOS AGREGADOS GRAÚDOS	58
TABELA 8 - MASSA ESPECÍFICA AGREGADO MIÚDO.....	58
TABELA 9 - CARACTERIZAÇÃO DO LIGANTE ASFÁLTICO SBS 60/85.....	59
TABELA 10 - COMPOSIÇÃO DOS AGREGADOS	60
TABELA 11- RESULTADOS DO ENSAIO DE ESTABILIDADE MARSHALL.....	65
TABELA 12 - RESULTADOS DO ENSAIO DE RESISTÊNCIA A TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL.....	68
TABELA 13 - RESULTADO DO ENSAIO DE ESCORRIMENTO	71

Lista de Abreviaturas e Siglas

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABEDA	Associação Brasileira de Empresas Distribuidoras de Asfalto
ANP	Agência Nacional do Petróleo
CAP	Cimento Asfáltico de Petróleo
CBUQ	Concreto Betuminoso Usinado a Quente
cm	Centímetro
CNT	Confederação Nacional do Transporte
CONAB	Companhia Nacional de Abastecimento
DER	Departamento de Estradas de Rodagem
dm	Densímetro
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
EAP	Emulsão Asfáltica de Petróleo
g	Grama
GO	Goiás
kg	Quilo
kgf	Quilograma-força
m	Metro
mm	Milímetro
NBR	Norma Brasileira
NCAT	<i>National Center for Asphalt Technology</i>
PR	Paraná
RT	Resistência a Tração
SMA	<i>Stone Matrix Asphalt</i>
SP	São Paulo
T	Temperatura
UNESP	Universidade Estadual Paulista

RESUMO

O modo rodoviário de transporte corresponde a maior parcela dos meios de transporte de carga e passageiros no Brasil, a sua gestão e manutenção exige a implementação de estratégias técnicas e econômicas eficientes. A implementação da mistura asfáltica do tipo SMA vem sendo realizada em vias de tráfego intenso, pistas de aeroporto, pátios de portos e vias urbanas, pelo fato de ser uma mistura de alta resistência e durabilidade. O objetivo geral deste trabalho foi a avaliação do comportamento da mistura asfáltica SMA com a incorporação do bagaço de cana-de-açúcar em substituição à fibra de celulose, realizando os procedimentos de dosagem Marshall, verificando a viabilidade de uso do bagaço de cana-de-açúcar e avaliando o comportamento mecânico da mistura asfáltica por meio dos parâmetros de estabilidade Marshall, fluência, resistência à tração por compressão diametral e outros. Os resultados obtidos na pesquisa comprovaram a viabilidade técnica da substituição da fibra de celulose pelo bagaço de cana-de-açúcar na mistura asfáltica SMA estudada. Observou-se que adição de bagaço de cana-de-açúcar não exerceu nenhuma alteração na trabalhabilidade da mistura asfáltica. Os valores de índice de vazios obtidos para os diversos teores de CAP foram relativamente baixos em função da faixa granulométrica adotada. A mistura atendeu ao critério de valor máximo de escoamento determinado pela norma específica. As propriedades mecânicas da mistura asfáltica atenderam aos limites especificados em norma com relação ao valor mínimo de capacidade de carga ou estabilidade Marshall, e resistência à tração por compressão diametral. O bagaço de cana-de-açúcar não possui função estrutural na mistura asfáltica e auxilia no transporte e manuseio da mistura por evitar o escoamento da mesma.

Palavras chaves: Mistura asfáltica SMA, bagaço de cana-de-açúcar, SMA com adição de bagaço de cana de açúcar.

Sumário

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO.....	15
1.1. OBJETIVOS	16
1.1.1. Objetivo Geral	16
1.1.2. Objetivos Específicos	16
1.2. JUSTIFICATIVA.....	16
1.3. HIPÓTESE.....	17
1.4. METODOLOGIA	17
1.5. ESTRUTURA DO TRABALHO.....	18
CAPITULO 2 – PAVIMENTOS ASFÁLTICOS.....	19
2.1. UMA BREVE ABORDAGEM SOBRE PAVIMENTOS	19
2.2. REVESTIMENTOS ASFÁLTICOS DE PAVIMENTOS.....	20
2.2.1. <i>Stone Matrix Asphalt</i> - SMA	21
2.3. LIGANTES ASFÁLTICOS	23
2.3.1. Asfaltos modificados	24
2.3.2. Estireno-Butadieno-Estireno - SBS	25
2.3.3. Experiências de aplicação de SMA.....	26
2.4. DOSAGEM DE MISTURAS ASFÁLTICAS	27
2.4.1. Método Marshall.....	27
2.4.2. Resistência à Tração por Compressão Diametral.....	30
CAPÍTULO 3 – FIBRAS UTILIZADAS EM MISTURAS AFÁLTICAS	32
3.1. FIBRA DE CELULOSE	32
3.2. A CANA-DE-AÇÚCAR E SEUS SUBPRODUTOS	33
3.2.1. O Bagaço de cana-de-açúcar.....	33
3.2.2. Pesquisas realizadas com o uso de fibras em misturas asfálticas.....	35
CAPÍTULO 4 – METODOLOGIA.....	37
4.1. CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS.....	38
4.1.1. Agregados.....	38
4.1.1.1. Granulometria	38
4.1.1.2. Desgaste por abrasão <i>Los Angeles</i>	39
4.1.1.3. Índice de forma	39
4.1.1.4. Adesividade	40
4.1.1.5. Massa específica dos Grãos, Absorção e Massa específica Aparente dos Grãos.....	40
4.1.2. Ligante asfáltico.....	42
4.2. MISTURA ASFÁLTICA SMA	45
4.2.1. Distribuição granulométrica	45
4.2.2. Teor ótimo de ligante asfáltico	45
4.2.3. Adição de fibras.....	46

4.2.4. Resistência à Tração por Compressão Diametral.....	47
4.2.5. Definição Final da Mistura SMA.....	48
CAPÍTULO 5 – RESULTADOS E DISCUSSÕES	50
5.1. CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS.....	50
5.1.1. Granulometria	50
5.1.2. Desgaste por Abrasão “ <i>Los Angeles</i> ”.....	53
5.1.3. Índice de forma	54
5.1.4. Adesividade	55
5.1.5. Massa específica dos Grãos, Massa Específica Aparente dos Grãos e Absorção	57
5.1.6. Ligante asfáltico.....	59
5.1.7. Cal hidratada.....	59
5.1.8. Fibras	59
5.2. PROJETO DA MISTURA ASFÁLTICA SMA	60
5.2.1. Composição Granulométrica	60
5.2.2. Método Marshall.....	61
5.2.2.1. Teor ótimo de ligante	65
5.2.2.2. Estabilidade Marshall	66
5.2.3. Resistência a Tração por Compressão Diametral.....	67
5.3. ENSAIO DE SENSIBILIDADE AO ESCORRIMENTO	68
CAPÍTULO 6 – CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS	72
Referências Bibliográficas.....	74

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

De acordo com a Confederação Nacional do Transporte (2017), o transporte rodoviário no Brasil é a principal alternativa para movimentação de cargas e passageiros, sendo responsável por 61% do transporte de cargas e 95% do transporte de passageiros. No Brasil temos um total de 1.735.621 km de rodovias, dessas 212.886 km são pavimentadas, correspondendo a apenas 12,3% do total.

Os pavimentos são estruturas de múltiplas camadas, sendo o revestimento asfáltico formado por uma mistura de agregados e ligantes asfálticos, que recebem diretamente as cargas do tráfego e distribui para as demais camadas.

A tecnologia de materiais e misturas asfálticas vem evoluindo nas últimas décadas. Para a camada de rolamento, vem crescendo a utilização em países desenvolvidos, de misturas asfálticas mais resistentes e duráveis, sendo que algumas destas soluções envolvem o emprego de graduação descontínua, tal como o SMA (*Stone Matrix Asphalt* – Matriz Pétreas Asfáltica).

O *Stone Matrix Asphalt* (SMA) surgiu na Alemanha e tem sido utilizado na Europa bem como na América do Norte. Mourão (2003) ressalta que sua aplicação tem sido realizada, principalmente em vias de tráfego intenso e/ou pesado, pistas de aeroportos, pátio de portos e vias urbanas, seja como camada de alta resistência e durabilidade, seja para auxiliar na aderência em pista molhada, na diminuição efetiva do spray ou borrfio de água pelos pneus, na redução da reflexão de luzes de faróis em noites chuvosas e na redução de ruídos nas áreas lindeiras à via.

A composição da mistura asfáltica do tipo SMA se dá por agregado graúdo, agregado miúdo, fíler e fibra de celulose, sendo que esta última proporciona à mistura uma maior resistência ao envelhecimento, pelo seu maior envolvimento com o ligante asfáltico e a prevenção do escorrimento, evitando assim a exsudação do material.

Leal (2013) afirma que a utilização do bagaço de cana-de-açúcar, um resíduo da indústria, contribui para a preservação do meio ambiente, seu uso pode reduzir o custo de produção do revestimento asfáltico, além de poder ser uma alternativa viável à sua substituição da fibra de celulose, permitindo características mecânicas semelhantes.

De acordo com a Alcarde (2016), o bagaço da cana-de-açúcar constitui-se em um dos mais importantes subprodutos para a indústria sucroalcooleira, pela proporção em que é produzido e devido a sua composição.

De acordo com a Companhia Nacional de Abastecimento (2017), há uma estimativa de melhora em relação à safra 2017/2018 com um crescimento de 7,5% e uma produção que pode chegar a 70 milhões de toneladas.

1.1. OBJETIVOS

A seguir serão apresentados os objetivos gerais e específicos do presente trabalho de conclusão de curso.

1.1.1. Objetivo Geral

O objetivo geral desta pesquisa é avaliar o comportamento de uma mistura asfáltica do tipo SMA, incorporando o bagaço da cana-de-açúcar, como alternativa à substituição da fibra de celulose.

1.1.2. Objetivos Específicos

- Realizar os procedimentos de dosagem Marshall de misturas asfálticas do tipo SMA, utilizando agregados da Região Metropolitana de Goiânia e incorporando o bagaço de cana-de-açúcar, em substituição à fibra de celulose;
- Verificar a viabilidade de uso do bagaço de cana-de-açúcar, para evitar o escorrimento do ligante asfáltico nas operações de mistura;
- Avaliar o comportamento mecânico e volumétrico das misturas SMA por meio dos ensaios de estabilidade Marshall, fluência e resistência à tração por compressão diametral estática.

1.2. JUSTIFICATIVA

Conforme o surgimento de novas tecnologias, as rodovias e seus métodos construtivos evoluíram. No entanto, o problema atual consiste em criar rodovias que suportem os novos tipos de veículos, principalmente de cargas em função do aumento do volume de tráfego, sem um

aumento financeiro significativo. As rodovias exercem um papel significativo no deslocamento de cargas e pessoas pelo Brasil.

Dentre os principais problemas detectados no pavimento destaca-se as trincas por fadiga e deformação permanente. Para minimizar o problema empregam-se misturas do tipo SMA, que normalmente utilizam fibras de celulose na sua composição, sendo este material de custo elevado no Brasil, devido à importação.

Segundo a Companhia Pernambucana de Saneamento (COMPESA), no ano de 2016 o revestimento asfáltico Concreto Betuminoso Usinado a Quente – CBUQ, custava R\$ 559,96 m³, já de acordo com Rangel (2015, p.85) o *Stone Matrix Asphalt* – SMA possui um valor entre R\$870 a R\$ 959,18 m³.

A utilização de resíduos descartados pelas indústrias tem sido objeto de inúmeras pesquisas no país e no mundo, visando contribuir para a sustentabilidade da cadeia produtiva e redução do descarte dos resíduos no meio ambiente. Além da questão ambiental tem-se também a questão de redução de custos devido à utilização de materiais sem valor comercial reconhecido.

Portanto a ideia de incluir o bagaço de cana-de-açúcar na mistura asfáltica do tipo SMA em substituição a fibra de celulose, vem para avaliar seu uso, e utilização deste tipo de mistura no país. Aliando a um revestimento de alta qualidade, um ganho ambiental e redução de custo.

1.3. HIPÓTESE

O bagaço de cana-de-açúcar incorporado a uma mistura asfáltica do tipo SMA apresenta características iguais ou similares à fibra de celulose.

1.4. METODOLOGIA

Em 1995 o DNER (Departamento Nacional de Estradas de Rodagem) especificou o ensaio Marshall para dosagens de misturas asfálticas, sendo que a norma define inicialmente as exigências quanto ao CAP (Cimento Asfáltico de Petróleo) e os agregados que serão utilizados na mistura. De acordo com Borges *et al.* (2016) a faixa granulométrica a ser adotada para os agregados é definida de acordo com norma vigente mais adequada ao trabalho que será realizado, sendo as faixas do DNIT (Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte) as mais empregadas.

Júnior e Rocha (2013) detalham que a dosagem Marshall é realizada promovendo uma mistura entre o CAP e os agregados, em combinação com uma energia da compactação estabelecida. Após os corpos de prova com diferentes teores de CAP estiverem prontos, serão submetidos a aplicação de esforços axiais de compressão diametral na prensa Marshall, com a finalidade de se obter a estabilidade (resistência) e a fluência (deslocamento) destes corpos amostrais.

1.5. ESTRUTURA DO TRABALHO

O presente trabalho está dividido em seis capítulos, conforme a descrição a seguir:

O Capítulo 1 – Introdução, apresenta um panorama dos pavimentos brasileiros, define o que é uma mistura asfáltica do tipo SMA, descreve a problemática do bagaço de cana-de-açúcar gerado, e apresenta a possibilidade do aproveitamento desse resíduo em pavimentação asfáltica.

O Capítulo 2 – Pavimentos Asfálticos, apresenta os materiais e as definições relacionadas à área de pavimentos asfálticos, misturas asfálticas, *Stone Matrix Asphalt* - SMA, tipos e características dos ligantes asfálticos e o método de dosagem Marshall, para misturas asfálticas.

O Capítulo 3 – Fibras utilizadas em misturas asfálticas, apresenta as características e aplicações das Fibras de celulose e do Bagaço de cana-de-açúcar em uma Mistura asfáltica do tipo SMA.

No Capítulo 4 – Metodologia, são apresentados os materiais e métodos utilizados na realização dos ensaios laboratoriais, caracterização dos materiais, agregados, ligante asfáltico, especificações das fibras utilizadas e a avaliação mecânica dos corpos de prova.

O Capítulo 5 – Resultados e Discussões, apresenta e analisa os resultados obtidos na pesquisa.

No Capítulo 6 – Conclusões, são apresentadas as conclusões, considerações finais, do trabalho e sugestões para trabalhos futuros.

CAPITULO 2 – PAVIMENTOS ASFÁLTICOS

Neste capítulo serão relatados os alicerces teóricos deste trabalho, abordando os seguintes assuntos como: pavimentos, ligantes asfálticos, misturas asfálticas do tipo SMA, SBS, polímeros e método de dosagem Marshall.

2.1. UMA BREVE ABORDAGEM SOBRE PAVIMENTOS

Pavimento é uma estrutura de múltiplas camadas construídas sobre o subleito, com a finalidade de resistir aos esforços do tráfego de veículos e dos pedestres. De acordo com a CNT (2017), a estrutura do pavimento tem a função de receber os esforços provenientes do tráfego e transmitir essas tensões geradas para as camadas inferiores de forma aliviada, já que essas são geralmente menos resistentes.

Os pavimentos são classificados em flexíveis, semi-rígidos e rígidos, sendo que o objetivo desta pesquisa são os pavimentos flexíveis ou asfálticos onde se é possível diversificar a composição de sua mistura asfáltica. O pavimento asfáltico é aquele em que todas as camadas sofrem deformação elástica significativa sob o carregamento aplicado e, portanto, a carga se distribui em parcelas aproximadamente equivalentes entre as camadas DNIT (2006). Os pavimentos asfálticos têm como uma de suas características serem constituídos por uma base de brita ou solo pedregulhoso e revestida por uma camada asfáltica. Na Figura 1 são detalhadas as etapas do processo construtivo de um pavimento, de acordo com a CNT (2017).

Figura 1 - Seção Transversal da Estrutura do Pavimento



Fonte: CNT (2017)

A seguir é apresentada uma definição das camadas indicadas na Figura 1, de acordo com a CNT (2017), que compõe os pavimentos asfálticos.

Subleito: é o terreno de fundação onde será apoiado o pavimento, responsável por neutralizar os esforços verticais causados pelo tráfego, sendo constituído de material natural consolidado e compactado.

Regularização: tem a finalidade de conformar o subleito no sentido transversal e longitudinal.

Reforço do subleito: camada de espessura longitudinal que têm a função de resistir e distribuir os esforços verticais adquiridos pelo tráfego. A sua espessura depende do dimensionamento do projeto e do pavimento.

Sub-base: camada complementar à base, realizada por circunstâncias técnico-econômicas quando a base tiver uma espessura grossa, tem como finalidade complementar a base, resistindo e distribuindo as ações causadas pelo tráfego.

Base: camada com a função de resistir e distribuir os esforços causados pelo tráfego.

Revestimento: é a camada que recebe diretamente os esforços do tráfego, com a finalidade de melhorar as condições de locomoção dos veículos e pedestres, além de gerar conforto e segurança aos usuários.

2.2. REVESTIMENTOS ASFÁLTICOS DE PAVIMENTOS

Segundo Ramos (2015), grande parte dos pavimentos brasileiros possuem em sua camada de revestimento misturas asfálticas compostas por agregados minerais, de diferentes granulometrias e composições, e ligantes asfálticos, dosados para atender os seguintes quesitos: impermeabilidade, flexibilidade, estabilidade, durabilidade, resistência à derrapagem, resistência à fadiga e ao trincamento térmico, entre outros.

De acordo com o tipo de ligante utilizado os revestimentos podem ser: a quente com o uso de Cimento Asfáltico de Petróleo – CAP ou a frio com o uso de Emulsões Asfálticas de Petróleo – EAP. As misturas a quente distinguem-se em vários tipos de acordo com o padrão granulométrico empregado e as exigências de características mecânicas e, também em função da aplicação. Trata-se do produto da mistura convenientemente proporcionada de agregados de vários tamanhos e cimento asfáltico, ambos aquecidos em temperaturas previamente

escolhidas, em função da característica viscosidade-temperatura do ligante (BERNUCCI *et al.*, 2006).

As misturas asfálticas usinadas a quente foram separadas em grupos específicos em função da graduação dos agregados, sendo especificadamente em três grupos de graduação: densa, aberta e descontínua.

Segundo Bernucci *et al.* (2006), a subdivisão das curvas granulométricas em determinadas classes de graduação facilita a diferenciação dos diversos tipos de misturas asfálticas. A seguir estão descritas as mais importantes classes de graduação dos agregados:

- Agregado de graduação densa: agregado com curva granulométrica contínua, que favorece o entrosamento entre os grãos, com os grãos menores preenchendo os vazios dos maiores, produzindo densidade próxima à máxima.
- Agregado de graduação aberta: agregado com curva granulométrica que apresenta certa continuidade, mas existe falta de finos para preencher os vazios dos grãos maiores.
- Agregado de graduação descontínua: agregado com curva granulométrica apresentando um degrau, caracterizando a falta de grãos intermediários. São agregados que, quando usados em misturas asfálticas, devem ser adequadamente trabalhados, pois são muito sensíveis à degradação (BERNUCCI *et al.*, 2006).

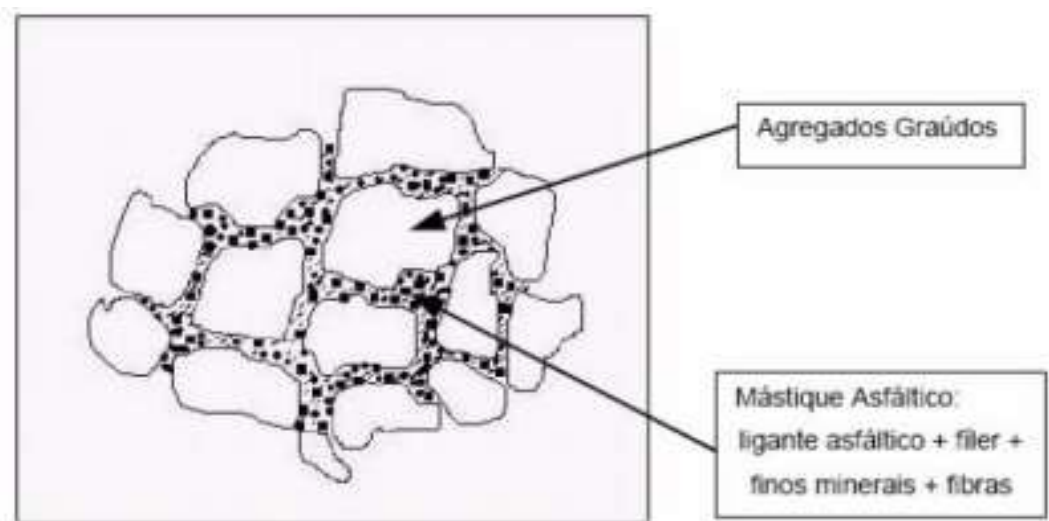
2.2.1. Stone Matrix Asphalt - SMA

O *Stone Matrix Asphalt* (SMA) foi desenvolvido na Alemanha no ano de 1968, denominado em alemão Splittmastixasphalten, com a finalidade de reduzir a deterioração que os pinos dos pneus causavam ao revestimento asfáltico à época de inverno. Com a proibição do uso dos pinos nos pneus e associado ao seu alto custo de implantação, o SMA caiu em desuso. Entretanto, Leal (2013) observa que tal técnica já havia chegado a outros países da Europa, onde se difundiu.

De acordo com o DER-SP (2007), a mistura asfáltica do tipo SMA é composta por pedrisco, pó de pedra, fibra de celulose, cal e filer, tendo como características principais a resistência à deformação permanente, superior qualidade de rolamento, alta resistência aos trincamentos e desagregações, apresentando uma boa aderência entre o pneu e o pavimento, drenável à água reduzindo a aquaplanagem e o ruído.

O SMA é um revestimento asfáltico usinado a quente, idealizado com a função de maximizar a ligação entre os agregados graúdos, composto com cerca de 70% a 80% do material retido na peneira nº 04. Por conta desta alta granulação, formam-se vazios na mistura, que são preenchidos com uma mistura (mástique asfáltico) constituída por filer, fração de areia, fibras (celulose ou minerais) e ligante asfáltico (MOURÃO, 2013), conforme é demonstrado na Figura 2, a seguir:

Figura 2 - Composição esquemática do SMA

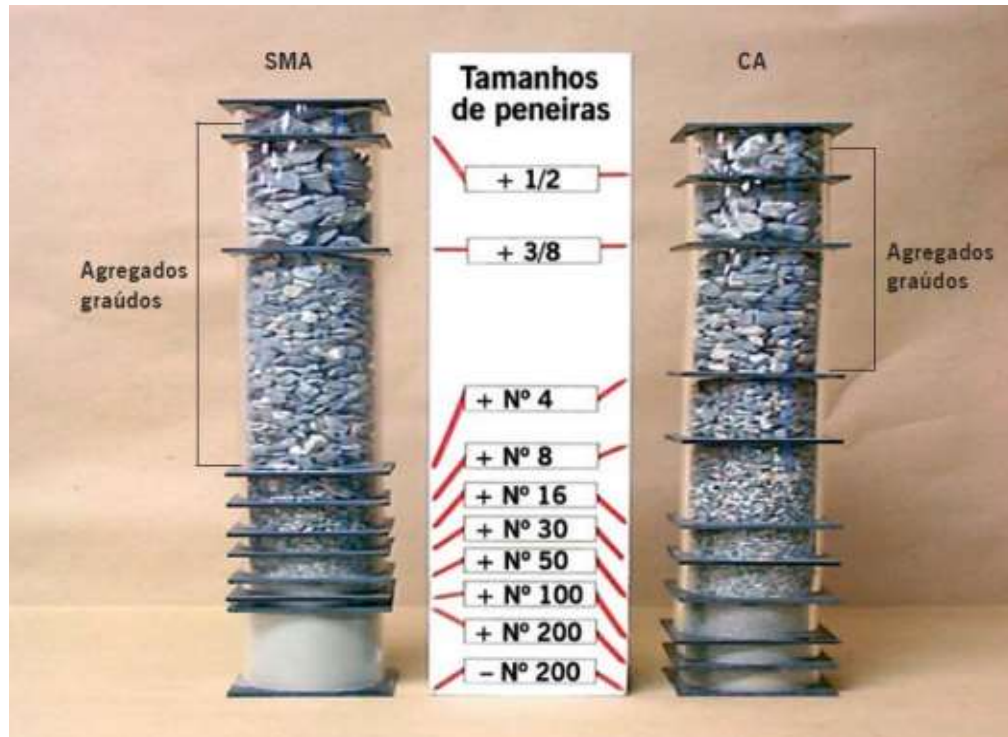


Fonte: RAMOS (2015, p. 53); NAPA (1999)

De acordo com Ramos (2015), sua aplicação é mais cara se comparada com as misturas asfálticas convencionais, porém, sua resistência é muito superior por conta de sua alta resistência, sendo mais utilizado na pavimentação aeroportuária ou em grandes rodovias onde se têm um elevado volume de tráfego.

A seguir na Figura 3, é feito um comparativo da granulometria de um SMA com misturas asfálticas convencionais de cimento asfáltico, demonstrando a diferença entre elas, e como a granulometria faz com que o SMA seja mais resistente do que as demais misturas asfálticas.

Figura 3 - Composições granulométricas comparativas entre SMA e um CA



Fonte: BERNUCCI et al, 2006

Balbo (2007), ressalta que a textura superficial resultante, devido à ausência de finos, possui maior rugosidade e estabelece uma espécie de rede de micro drenagem superficial, o que evita a formação de lâminas finas d'água durante períodos chuvosos, favorecendo a aderência ou contato dos pneus com os agregados superficiais.

De acordo com El-Hage (2012), em comparação às misturas convencionais, é característico que as misturas asfálticas do tipo SMA tenham um maior consumo de ligante asfáltico, que proporciona uma maior espessura recobrindo o agregado, resultando em uma superior resistência ao desgaste e ao envelhecimento, além de maior durabilidade e maior resistência à fadiga.

2.3. LIGANTES ASFÁLTICOS

O asfalto, segundo a Agência Nacional de Petróleo - ANP (2018), é um material de cor escura, consistência de sólida a semi-sólida, composto de asfaltenos, resinas e hidrocarbonetos pesados, constituído predominantemente por betumes que age como um elemento aglutinador.

De acordo com Pinheiro (2004) pode-se obter o asfalto de duas formas, encontrando-o na natureza sob forma de asfalto natural, em lagos e/ou camadas geológicas subterrâneas ou do processo de destilação fracionada do petróleo. No processo de destilação do petróleo são retirada as frações mais leves como: gasolina, querosene e gasóleo, e o produto asfáltico empregado na pavimentação é obtido no fundo da torre. Tal produto passa ter o nome de Cimento Asfáltico de Petróleo – CAP, podendo ser classificado de acordo com a viscosidade e a penetração, sendo esta última a atualmente utilizada.

Existe uma série de derivados do petróleo utilizados em pavimentação. Os tipos existentes no mercado brasileiro, recebem as seguintes denominações, segundo (LEITE, 1999 apud NOGUEIRA 2008):

- Cimentos Asfálticos de Petróleo (CAP);
- Asfaltos Diluído de Petróleo (ADP);
- Emulsão Asfáltica de Petróleo (EAP);
- Asfaltos Emulsionados;
- Asfaltos Modificados;
- Asfaltos Oxidados ou Soprados; e
- Agentes Rejuvenescedores.

Neves Filho (2004) ressalta que uma mistura SMA, possui um maior teor de ligante, fazendo-se necessário o uso de aditivos para o aumento da consistência, esses aditivos podem ser polímeros e/ou fibras.

2.3.1. Asfaltos modificados

Pinheiro (2004), ressalta que a crescente demanda ao pavimento, provocado pelo aumento das cargas por eixo em veículos pesados, vêm levando ao desenvolvimento de novas técnicas além de uma melhoria da qualidade superior das misturas e de suas composições. Os modificadores do ligante entram como um dos agentes mais importantes nessa melhoria de qualidade das misturas.

Segundo Lewandowski (1994, *apud* Mothé 2009), os modificadores de ligantes têm como princípio o aumento da resistência dos asfaltos às deformações permanentes em altas temperaturas sem afetar as propriedades do asfalto em outras temperaturas. Obtêm-se tal

resposta viscoelástica quando há um aumento da componente elástica e uma redução da componente viscosa.

Esta modificação nos ligantes, principalmente por polímeros, tem sido uma opção para suprir determinadas deficiências do cimento asfáltico puro. Deseja-se que estes modificadores poliméricos tenham maior recuperação elástica, alto ponto de amolecimento, alta viscosidade, maior ductilidade e maior poder de coesão (AIREY 2003, *apud* MOTHÉ 2009).

De acordo com Bernucci *et al.* (2006) o comportamento do polímero depende dos materiais de partida (monômeros), do tipo de reação empregado para sua obtenção e da técnica de preparação. Os tipos de reação empregados são:

- Poliadição por SBR (borracha estireno-butadieno) e EVA (etileno-acetato de vinila);
- Policondensação sendo ER e PET; e
- Modificação química de outro polímero, no caso do SBS (estireno-butadieno-estireno).

A Especificação de Serviço do DER-SP (2007), determina que em misturas asfálticas do tipo SMA, devem ser empregados cimentos asfálticos modificados por polímeros, sendo mais específico, do tipo SBS.

2.3.2. Estireno-Butadieno-Estireno - SBS

Amaral (2000) define o SBS como um polímero industrial do tipo elastômero termoplástico, sendo uma borracha sintética de estireno-butadieno-estireno.

De acordo com Freitas (1996) a presença do SBS na estrutura do CAP diminui as contrações nos efeitos negativos causados pela oxidação do CAP, ou seja, pela diminuição dos maltenos ao longo do tempo que produzem seu processo de envelhecimento, levando o pavimento a perder a capacidade de defletir, resultando no trincamento.

Valkeringet *al.* (1990, *apud* Mugayar 2004), ressaltam que o principal objetivo da adição do SBS é aumentar a estabilidade mecânica para suportar os efeitos do aumento das cargas do tráfego. E acrescenta que em concentrações de 3% a 7%, corresponde uma redução de 60% a 70% das trilhas de roda.

2.3.3. Experiências de aplicação de SMA

Reis (2002) um estudo a respeito da utilização do SMA como revestimento asfáltico em vias de tráfego pesado. O autor obteve como resultado que o SMA apresenta bom desempenho quando exposto ao clima quente e ainda sob cargas pesadas, além de um aumento na aderência quando a pista está molhada e redução do ruído.

Em 2005 a Alemanha atualizou a sua norma do SMA, intitulada como “*Stone Matrix Asphalt – Lothar Drüschner and Volker Schäfer*”, contendo aproximadamente 30 páginas, a norma detalha o surgimento do SMA, suas características físicas e mecânicas, propriedades e áreas onde pode-se aplicar, a composição da mistura asfáltica, os ensaios que se realizam para saber se o SMA encontra nas condições adequadas e explica a diferença entre o SMA 0/11S, SMA 0/8S, SMA 0/8 e o SMA 0/5.

Filho elaborou em 2007 um estudo sobre a consequência mecânica do SMA com a utilização de diferentes granulometrias, o autor chegou à conclusão que a utilização de um agregado graúdo com diâmetro de 4,75 mm obtém um desempenho comparável com o agregado graúdo de 12,5 mm.

No ano de 2011 Gardete, Santos e Capitão desenvolveram um estudo sobre a formulação volumétrica e desempenho do SMA, os autores chegaram ao resultado que quando o betume varia em torno de 6,5% sua porosidade é de 4%, a estabilidade gira em torno de 7 a 8,5 kN e que a deformação obtida pelo corpo de prova é de no máximo 4,00 mm.

El-Hage (2012) realizou um estudo do SMA à luz dos compactadores Marshall e Superpave. Tal pesquisa teve como objetivo principal analisar como realizar o procedimento no Compactador Giratório Superpave para que se chegasse ao nível de energia e características do compactador Marshall.

Em 2012, Ramos analisou o SMA aplicado nos pavimentos aeroportuários, abordando literaturas existentes e realizando um estudo de campo no aeroporto de Natal/RN, com foco na pista de decolagem e pouso, o autor chegou ao resultado que a mistura asfáltica do tipo SMA possui boas características de atrito, bom desempenho estrutural e vida de serviço elevada.

No ano de 2015, Ramos estudou a aplicação do SMA no aeroporto de Aracaju/SE, focando na área de movimento das aeronaves (pista de pouso e decolagem, pista de táxi e pátio de estacionamento das aeronaves), a conclusão do autor foi que a aplicação do SMA no trecho

experimental do aeroporto promoveu uma melhoria na aderência do atrito e macrotextura, da drenagem superficial e no conforto ao rolamento.

2.4. DOSAGEM DE MISTURAS ASFÁLTICAS

O método de dosagem de misturas asfálticas atualmente utilizado no Brasil é o método Marshall. Porém encontra-se em fase de implantação o novo método brasileiro de dimensionamento de pavimentos asfálticos denominado de MEDINA – Método de Dimensionamento Nacional de pavimentos asfálticos, denominação dada em homenagem a um de seus criadores, o professor Jaques de Medina.

Esse novo método, mecanístico-empírico, baseia-se na metodologia americana denominada SUPERPAVE, com a realização de ensaios modernos para obtenção das características e propriedades dos materiais e misturas asfálticas.

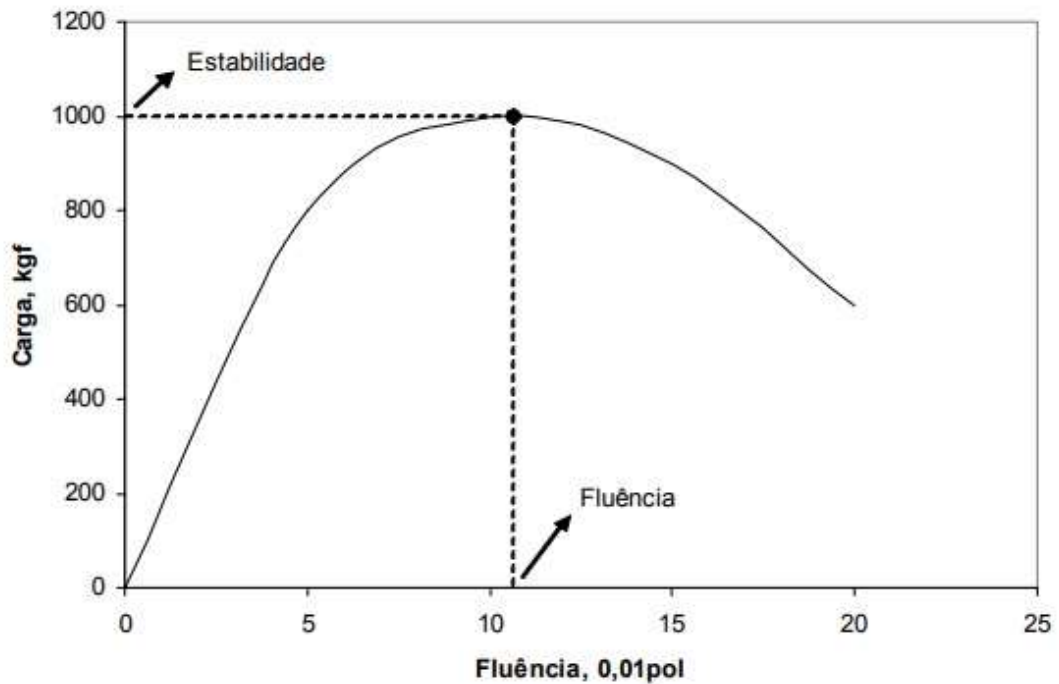
2.4.1. Método Marshall

O Método Marshall foi concebido por Bruce G. Marshall, na década de 1930, com o intuito de permitir a determinação da quantidade ótima de ligante para a composição de misturas asfálticas preparadas a quente para fins de pavimentação rodoviária (Coelho, 1995).

Tal Método faz uso de experimentos laboratoriais para o desenvolvimento de misturas asfálticas que tenham características desejadas de estabilidade/fluência e massa específica/vazios. Sendo o método de maior utilização no mundo, para projetos de misturas asfálticas. No Brasil, tal método, é normatizado pelo Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes – DNIT, DNER-ME 043/95.

Segundo a norma do DNER (043/95), Estabilidade é a resistência máxima à compressão radial, apresentada pelo corpo de prova, quando moldado e ensaiado em condições estabelecidas pelo método. Já a Fluência é a deformação total apresentada pelo corpo-de-prova em função da aplicação da carga máxima em milímetro. O valor da fluência é obtido simultaneamente ao da estabilidade, no momento em que se der o rompimento do corpo de prova, conforme demonstra a Figura 4.

Figura 4 - Exemplo de curva de estabilidade e fluência Marshall de uma mistura asfáltica



Fonte: NASCIMENTO, 2008.

Nascimento (2008), define a estabilidade Marshall como a carga máxima aplicada em um corpo de prova, a 60°C, numa velocidade de carregamento de 50,8 mm/min. Ela varia em função do teor de ligante, servindo de parâmetro para auxiliar na definição do teor ótimo, porém não garantindo desempenho adequado à mistura em termos de deformação permanente.

O processo de dosagem de misturas asfálticas pela metodologia Marshall é basicamente realizado em duas etapas: Preparação dos corpos de prova e Determinação da Estabilidade e Fluência. Para a primeira etapa, preparação dos corpos de prova, são realizadas três etapas essenciais: preparação das misturas, controle das temperaturas de mistura e compactação e compactação de corpos de prova. A segunda etapa, determinação da estabilidade e fluência dos corpos de prova está representada na Figura 5.

Figura 5 - Prensa Marshall



Fonte: BERNUCCI et al., 2006

Na primeira etapa, verifica-se a temperatura a que o ligante asfáltico que deve ser aquecido, para então, ser misturado aos agregados. A temperatura ideal é aquela cuja viscosidade seja de 170 cSt podendo variar ± 20 ou 85 sSF podendo variar ± 10 . Posteriormente verifica-se a temperatura de compactação da mistura, na qual o CAP deve apresentar uma viscosidade de 280 cSt variando ± 30 ou 140 sSF variando ± 15 .

Para a realização do ensaio Marshall é necessário realizar a compactação da mistura asfáltica com cinco teores de ligante, sendo necessários 3 corpos de prova, para cada teor. Tendo conhecimento das porcentagens, em massa, em que os componentes da mistura terão que conter, calcula-se a quantidade de cada material ou fração para compor cada corpo de prova. Para pesagem é necessário que os agregados tenham sido secos, em suas respectivas frações, até sua massa adquirir constância. Em seguida pesa-se cada material, em refratários separados, nas quantidades estipuladas previamente, até atingir a massa de 1200 g.

Logo em seguida coloca-se o material em uma estufa, para aquecê-lo à uma temperatura de 10° C a 15° C acima da temperatura do ligante. Após o aquecimento retirar cada porção referente a um corpo de prova, misturar os agregados, de forma que o centro forme uma cratera, para receber o ligante asfáltico, de forma a facilitar a mistura em até 3 minutos.

Para compactação dos corpos de prova, o molde e base do soquete devem estar limpos e aquecidos à mesma temperatura estabelecida para a compactação da mistura asfáltica. Antes de adicionar a mistura no molde, coloca-se uma folha de papel filtro sobre a base. Em seguida coloca-se a mistura de uma só vez dentro do molde, aplicando-se 15 golpes vigorosos de espátula na amostra ao redor do molde e 10 golpes no centro da mistura. Após acomodação do material no molde, aplicam-se os golpes referentes ao ensaio, que pode ser 50 ou 75 de cada lado do corpo de prova. Decorridos alguns minutos da compactação, o corpo de prova é colocado em uma superfície plana, sem interferências, para ficar 12 h de repouso à temperatura ambiente. Após concluída a compactação do primeiro corpo de prova, repete-se o mesmo processo para as demais amostras, até contemplar um total de 15 corpos de prova compactados, ou seja, 5 teores de ligante, com 3 corpos de prova cada um.

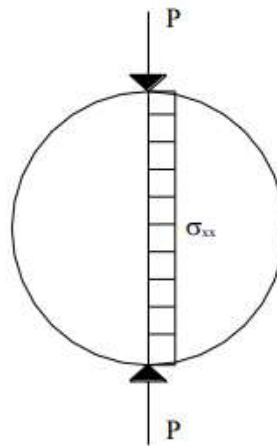
Para segunda etapa, determinação da Estabilidade e da Fluência, os corpos de prova devem ser imersos em banho termostático (banho-maria) à temperatura de 60°C, por um período de 30 a 40 minutos ou colocados em estufa por duas horas a mesma temperatura. Em seguida, os corpos de prova, devem ser colocados no molde de compressão, onde o mesmo, é posicionado na prensa juntamente com o medidor de fluência. A Figura 4 apresenta uma prensa utilizada, para a realização do ensaio Marshall. A prensa é operada com seu êmbolo elevando a uma velocidade de 5 cm/min, até o rompimento do corpo de prova, indicando a carga máxima suportada pelo corpo de prova (estabilidade Marshall) e o respectivo deslocamento máximo (Fluência). Os valores de “Estabilidade lida” são corrigidos posteriormente multiplicando-se os valores determinados na prensa, por um fator de correção, que é dado em função da altura de cada corpo-de-prova, que deve apresentar um valor de $63,5 \pm 1,3$ mm.

2.4.2. Resistência à Tração por Compressão Diametral

A resistência à tração por compressão diametral é um importante critério para a caracterização de materiais como o concreto de cimento Portland e os concretos asfálticos. O ensaio brasileiro de compressão diametral para determinação indireta da resistência a tração (RT) foi criado pelo Professor Lobo Carneiro para concreto de cimento Portland, conhecido nacionalmente e intencionalmente como “Ensaio Brasileiro” FATOS & ASFALTOS (2006).

De acordo com Falcão e Soares (2015), a aplicação de duas forças concentradas e diametralmente opostas de compressão em um cilindro gera, ao longo do diâmetro carregado nos corpos de prova, tensões de tração uniformes e perpendiculares a este diâmetro (Figura 6).

Figura 6 - Tensão de tração uniforme devido à compressão diametral



Fonte: Falcão e Soares, 2015

Bernucci et al. (2008, *apud* Pavei, Arns e Villena 2014) comentam que: “A configuração do ensaio de tração considera a aplicação de duas forças concentradas e diametralmente opostas de compressão em um cilindro que geram, ao longo do diâmetro solicitado, tensões de tração uniformes perpendiculares a esse diâmetro [...]”.

O ensaio ficou conhecido por ser de extrema facilidade e rapidez na execução. Além de utilizar os mesmos equipamentos no ensaio de compressão de concreto-cimento eles podem ser utilizados para os ensaios de caracterização de misturas asfálticas, tendo uma aplicação das forças através de frisos de carga no corpo de prova cilíndrico do ensaio Marshall convencional.

Pavei, Arns e Villena (2014), afirmam que o primeiro passo para realizar o ensaio RT é a definição do teor ótimo de ligante, descoberto anteriormente no Método Marshall. Após saber-se o teor ótimo de ligante compactam-se 3 corpos de provas com esse teor e os mesmos são submetidos ao ensaio de acordo com a norma do DNIT 136/2010–ME.

Este padrão adquirido no ensaio de RT considera, portanto, que a ruptura ocorre ao mesmo tempo em todos os pontos sob o diâmetro compelido no ensaio de RT, devido somente às tensões de tração geradas, desta forma, as forças de rupturas menores são atingidas no ensaio de compressão diametral realizados com a utilização de frisos de larguras menores, uma vez que a predisposição para a carga concentrada gera um valor maior de tensão de tração.

CAPÍTULO 3 – FIBRAS UTILIZADAS EM MISTURAS AFÁLTICAS

Misturas asfálticas do tipo SMA, em função do alto teor de ligante asfáltico, necessitam de fibras como aditivo estabilizante para que não haja segregação ou exsudação durante o processo de mistura e espalhamento. As fibras utilizadas não produzem nenhuma alteração química no cimento asfáltico, mas as propriedades físicas são alteradas, permitindo o aumento do teor de asfalto empregado na produção da mistura (LEAL, 2013).

3.1. FIBRA DE CELULOSE

As fibras atuam de forma a evitar a segregação das misturas, quando essas são expostas à elevadas temperaturas de usinagem e compactação, além de possibilitar que a mistura seja submetida a baixas temperaturas sem sofrer degradação (LANCHAS, 1999).

Essas fibras podem vir em forma de pellets, como apresentado na Figura 7, onde parte é composto de fibra e parte de ligante asfáltico. As fibras quando não impregnadas com ligante não conseguem se dispersar na mistura, devido as mesmas serem fortemente unidas. Mourão (2003) destaca que quando estão impregnadas com ligante apresentam, além da facilidade de dispersão, as seguintes vantagens: são inodoras e livres de pó, possuem insensibilidade a umidade, apresentam facilidade de dosagem e produção de mistura mais homogênea.

Figura 7 - Fibra de celulose em pellet



Fonte: VALE, 2007

Leal (2013), ressalta que em misturas asfálticas como SMA a fibra de celulose desempenha o importante papel de controlar as características de escorrimento dessas misturas. Segundo Stael

(1997, *apud* Vale 2007), as características estruturais da celulose e sua forma fibrosa, dão a esse material requisitos para aplicação em diversas áreas da engenharia.

3.2. A CANA-DE-AÇÚCAR E SEUS SUBPRODUTOS

De acordo com Rodrigues (2010) historicamente a cultura da cana de açúcar surgiu no Brasil em meados do século XVI pela necessidade de se colonizar, defender e explorar as riquezas do território brasileiro, houve inúmeros motivos para a escolha da cana, sendo um dos mais relevantes a existência de solo de massapé no Brasil, propício para este cultivo. Além disso, a açúcar era, naquela época, um produto muito valorizado no comércio europeu, tendo um expansivo consumo e gerando valiosos lucros, transformando-se assim no eixo econômico da colonização portuguesa no Brasil entre os séculos: XVI e XVII.

As primeiras mudas vieram da Ilha da Madeira, em Portugal, no século XVI por Martim Afonso de Souza, responsável pela instalação do primeiro engenho brasileiro em São Vicente no ano de 1532. Logo após a instalação deste engenho, muitos outros foram instalados pela costa brasileira, especialmente no litoral dos estados do Pernambuco e Bahia (RODRIGUES, 2010).

O Brasil ocupa mais de 8 milhões de hectares com plantações de cana-de-açúcar, sendo então o País, o maior produtor mundial de cana e de seus derivados (RONQUIM, 2010). A produção 2017/18 está estimada em 647,8 milhões de toneladas de acordo com o CONAB (2017). O setor de produção de açúcar e etanol que são produtos derivados da cana-de-açúcar é um dos setores mais importantes da economia brasileira (ENSINAS, 2008).

Oliveira *et al.* (1999) afirmam que quando se sobrepõe ao solo uma camada vegetal feita a partir do resto da colheita da cana-de-açúcar (folhas secas, os ponteiros e as folhas verdes) aumenta-se a infiltração de água no solo, diminui-se a erosão e a evaporação edáfica melhorando ainda a estrutura do solo.

3.2.1. O Bagaço de cana-de-açúcar

O bagaço de cana-de-açúcar é o produto oriundo a partir da moagem da cana-de-açúcar, conforme demonstrado na Figura 8, considerado como uma biomassa sucroenergética que gera eletricidade e combustível renovável NOVACANA (2013).

Figura 8 - Bagaço de cana-de-açúcar



Fonte: NOVACANA, 2017

De acordo com a UNESP (2012), o bagaço de cana-de-açúcar, é rico em polissacarídeos (açúcares complexos), sendo estes açúcares são a celulose e a hemicelulose e a lignina, uma estrutura complexa que gera uma maior resistência mecânica, além destes compostos, o bagaço é constituído por potássio, sílica, manganês, sódio e cálcio.

Silva, Gomes e Alsina (2007) listam os compostos do bagaço de cana-de-açúcar, conforme Tabela 1 abaixo.

Tabela 1 - Composição química do bagaço de cana-de-açúcar

Composição química média	
Carbono	39,7 – 49%
Oxigênio	40 – 46%
Hidrogênio	5,5 – 7,4%
Nitrogênio e cinzas	0 – 0,3%
Propriedades físico-químicas	
Umidade	50%
Fibra	46%
Impurezas minerais	2%
Composição média da fibra do bagaço	
Celulose	26,6 – 54,3%
Hemicelulose	14,3 – 24,4%
Lignina	22,7 – 29,7%

Fonte: adaptado de SILVA, GOMES E ALSINA (2007)

De acordo com Gouveia, Nascimento e Souto-Maior (2009) o bagaço de cana-de-açúcar é abundante em complexos orgânicos de carbono e constituídos de celulose, hemicelulose e lignina, além de apresentar alto teor de carboidratos.

Até o ano de 2030 o Brasil projeta uma utilização de 76% da biomassa do bagaço de cana-de-açúcar com a palha na utilização da geração de eletricidade, este projeto faz parte de um pacto que foi assinado no final de 2015 na China com o propósito de reduzir os efeitos da camada de ozônio e evitar o aumento do aquecimento global NOVACANA (2017).

3.2.2. Pesquisas realizadas com o uso de fibras em misturas asfálticas

Vale (2007), Vale elaborou um estudo laboratorial da viabilidade do uso de fibras de coco em uma mistura asfáltica SMA. Por conta da abundância do coco na região nordeste, a autora propôs a reutilização deste material com a finalidade de substituição da fibra de celulose no SMA. O estudo concluiu que a fibra de coco obteve os mesmos resultados da fibra de celulose no método Marshall, além do que a utilização da fibra de coco é economicamente mais viável do que a fibra de celulose, naquela região.

Soren (2012) analisou a adição do bagaço de cana-de-açúcar no SMA; a autora chegou à conclusão de que a viscosidade aumenta com a adição do teor de betume, tanto nas misturas com e sem fibras. Inicialmente o aumento é lento, porém a taxa aumenta de acordo com o aumento do conteúdo de betume. O valor da viscosidade das misturas, inicialmente, com fibras é maior do que sem fibras. Isto pode ser devido ao fato de que quanto menor o teor de betume mais as fibras preenchem os vazios, contribuindo ativamente para a homogeneidade e proporcionando assim a estabilidade necessária para resistir a qualquer deformação sob carga.

Porem à medida que o teor de betume aumenta, essa homogeneidade é perdida, devido a propriedade que o ligante domina, o que faz com que as fibras formem grumos, reduzindo a estabilidade e aumentando a deformação sob carga. Além disto, a autora constatou que os vazios de ar diminuem com o aumento do conteúdo de betume, porque ele continua a preencher os vazios de ar progressivamente, os corpos de prova que continham o bagaço de cana-de-açúcar tiveram um nível de vazios de ar expressivamente menor do que os corpos de prova que não continham o bagaço, pelo fato da fibra preencher uma parte dos vazios.

Leal (2013) abordou um estudo sobre o aproveitamento do bagaço de cana-de-açúcar em mistura asfáltica SMA, o autor fez vários testes comparando o SMA com fibra de celulose com

o SMA contendo bagaço de cana-de-açúcar, ao final de todos os testes chegou se ao resultado de que o bagaço de cana de açúcar tem o desempenho similar ao da fibra de celulose.

Vilvakumar, et al. (2013) desenvolveu um estudo sobre a performance do bagaço de cana de açúcar no SMA, neste estudo eles relatam que nos EUA para cada 10 toneladas de cana de açúcar gera-se 3 toneladas de bagaço. O objetivo principal deste estudo foi de analisar se o bagaço de cana-de-açúcar é um estabilizante dentro do SMA e as propriedades mecânicas que ocorrem no SMA com a adição do bagaço de cana-de-açúcar.

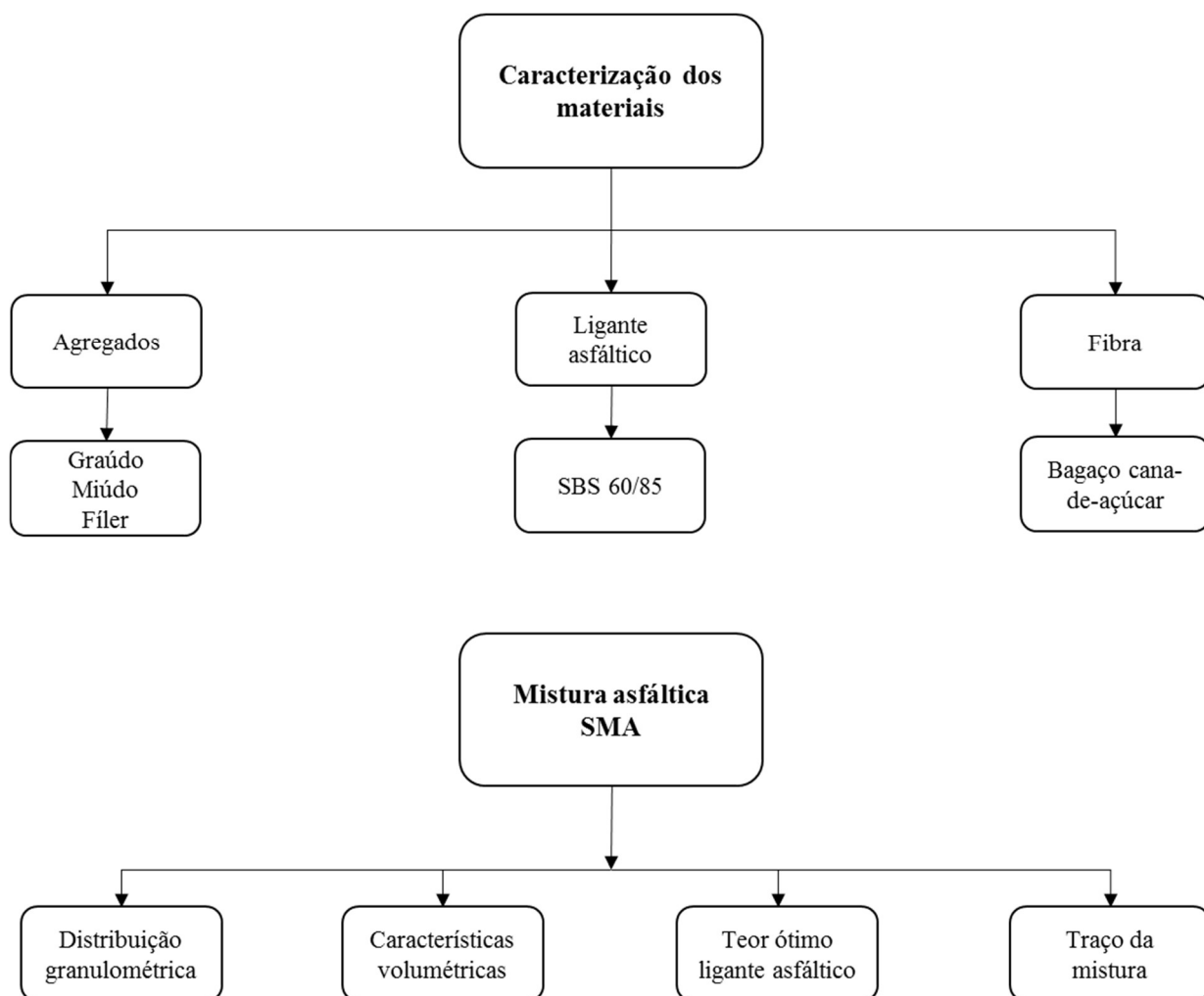
Sheng, et al. (2017) elaboraram um artigo citando o que a fibra de carbono influencia no desempenho do SMA, embora este trabalho trate de outro tipo de fibra, ele é essencial pelo fato das relevâncias que os autores chegaram sobre a substituição da fibra de celulose pela de carbono, tais como resistência, estabilidade, durabilidade, nível de ruído, resistência ao cisalhamento, fadiga e sensibilidade à água. Além da fibra de carbono foram aplicados na mistura outros quatro tipos de fibras (fibra floculenta, fibra mineral, fibra de poliéster e fibra misturada). Os resultados indicaram que a massa específica da mistura de SMA e saturação de asfalto diminuiu com o teor crescente de fibras, enquanto a percentagem de vazios de ar nas misturas betuminosas aumentou.

Rekha & Rao (2017) desenvolveram na cidade Telangana na Índia um estudo a respeito da utilização do bagaço de cana-de-açúcar e também da fibra de poliéster na mistura SMA, as autoras relatam que na Índia as fibras são de fácil aquisição e de custo acessível. O resultado final deste trabalho foi que as fibras do bagaço devem ter um comprimento entre 1 a 1,5 cm, acima de 1,5 cm aumenta o ar dentro do corpo de prova e o desempenho medido pelo ensaio Marshall obtém uma piora significativamente.

CAPÍTULO 4 – METODOLOGIA

Neste capítulo, está descrita a metodologia utilizada, desde a obtenção dos materiais até a finalização da dosagem. O processo será constituído de duas etapas: caracterização dos materiais e dosagem da mistura asfáltica SMA, conforme demonstrado no fluxograma a seguir (Figura 9).

Figura 9 - Fluxograma da Metodologia



4.1. CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

Para certificação da qualidade da mistura asfáltica é preciso ensaiar todos os materiais antes de sua efetiva utilização, de acordo com as normativas vigentes. Este procedimento é necessário para garantir os mesmos parâmetros, procedimentos e referências independentemente do local e tipo de material escolhido.

4.1.1. Agregados

Os agregados utilizados nesta pesquisa foram cedidos pela Pedreira Pedra Britada, localizada em Goianópolis - GO, a aproximadamente 31 km de Goiânia. Sua formação rochosa é de origem basáltica. Todos os agregados foram submetidos aos ensaios de caracterização para certificação de suas propriedades e atendimento das exigências estabelecidas pelas normas técnicas dos órgãos responsáveis ABNT e DNIT.

4.1.1.1. Granulometria

O método empregado para determinação das características granulométricas da Brita 0, Brita 1 e Pó de pedra foi o do DNER, atualmente DNIT, DNER-ME 083/98 e as considerações ABNT NBR 7211/2009. A faixa granulométrica escolhida para dosagem do SMA foi a faixa I da Norma Alemã ZTV *Asphalt – StB*, indicada para tráfego pesado ou solicitações especiais. Sendo assim foram utilizadas as seguintes peneiras: 12,5mm (1/2”), 7,93mm (5/16”), 4,75mm (Nº 4), 2,0mm (Nº 10) e 0,075mm (Nº 200).

O ensaio de granulometria consiste em secar a mostra em estufa à $\pm 110^{\circ}\text{C}$, deixar esfriar à temperatura ambiente e determinar a sua massa total sem a presença de umidade. Organizar as peneiras em ordem crescente da base para o topo com as peneiras escolhidas anteriormente e colocar a amostra na peneira superior, tampar e ligar o agitador. O tempo necessário é relativo e seu parâmetro de parada é até que não mais que 1% da massa total da amostra passe em qualquer peneira durante um minuto. Na sequência pesa-se o material retido em cada peneira, anotando em planilha apropriada. Deve-se observar que o somatório de todas as massas retidas, não deve diferir mais que 0,5% da massa seca inicial, caso a diferença seja superior a 0,5% repetir o ensaio.

4.1.1.2. Desgaste por abrasão *Los Angeles*

O método para determinação da abrasão “*Los Angeles*” sofrido pelo agregado é determinado através da Norma DNER-ME 035/98.

Para realização do ensaio é necessário primeiramente definir a graduação da amostra através de uma tabela que possui as graduações que variam de A a G indicando também a quantidade de amostra e suas variações permitidas. A escolha não se dá de forma aleatória e sim buscando a granulometria que possua resultados que mais se assemelham com os materiais utilizados, para uma melhor representatividade.

Após a definição da graduação, o material deve ser lavado e seco em estufa à temperatura entre 105°C e 110°C. Após secagem a amostra é peneirada e quarteada em diferentes porções nas diferentes peneiras para uma melhor homogeneização e fornecimento da graduação escolhida. Em seguida reúnem-se as diversas porções da mesma graduação, somam-se as massas parciais para obter o valor da massa da amostra seca.

A amostra é colocada no tambor juntamente com as esferas e o mesmo é fechado e colocado em movimento com velocidade de 30 a 33 rpm até completar de 500 a 1000 rotações, conforme graduação escolhida. Finalizando as rotações retira-se o material do tambor, limpam-se as esferas, passa-se a amostra na peneira 1,7 mm rejeitando-se o material passante. Lava-se o material retido e em seguida é levado para estufa em temperatura entre 105°C e 110°C por no mínimo 3 horas. Após secagem e esfriamento à temperatura ambiente o material deve ser pesado para determinação de sua massa seca.

4.1.1.3. Índice de forma

Para misturas asfálticas do tipo SMA é ideal um índice de forma superior a 0,5, obtido pelo método dos crivos circulares e retangulares e porcentagem de partículas lamelares inferior a 10%, segundo Especificação Técnica do DER-SP (2007). Outro método utilizado para determinar o índice de forma dos agregados graúdos é o do paquímetro, que foi utilizado nessa pesquisa. A normativa que prescreve este ensaio é a ABNT - NBR 7809/06, que sugere o método de realização do ensaio.

Inicialmente deve-se secar a amostra em estufa com temperatura entre 105°C variando $\pm 5^\circ\text{C}$, até atingir uma massa constante. Logo após realizar um ensaio de análise granulométrica,

dividindo em frações, onde a própria norma estabelece a massa mínima necessária de amostra, desprezando material passante na peneira de 9,5mm e as peneiras com porcentagens retidas simples $\leq 5\%$.

Efetuar, com o auxílio de um paquímetro com precisão de 0,1 mm, as medidas de comprimento e espessura do agregado gráudo individualmente. O resultado se dá através de uma média ponderada entre as relações de comprimento e espessura maior e menor dimensão, medidas ortogonalmente.

4.1.1.4. Adesividade

A determinação da adesividade do ligante asfáltico ao agregado gráudo é prescrita pela norma ABNT - NBR 12583/17. O Procedimento necessário para determinação será descrito a seguir. O ensaio consiste em utilizar o material passante na peneira de 19 mm e retido na de 12,5 mm. O material amostrado deve ser lavado e colocado em um recipiente com água destilada durante 1 min, logo após levar à estufa por 2h a uma temperatura de 120°C.

Aquecer 500g do agregado a 100°C e o ligante asfáltico que será utilizado nas dosagens, no caso no CAP à 120°C. Adicionar sobre os agregados aquecidos, 17,5 g de CAP com o auxílio de uma espátula até envolver totalmente a amostra. Tal amostra é colocada em uma placa de vidro de superfície lisa, em seguida em um béquer de vidro e encoberto com água destilada. O recipiente é levado à estufa por 72 h em uma temperatura de 40°C. O resultado se dá, de forma satisfatória quando não houver nenhum deslocamento da película betuminosa, caso contrário é insatisfatório.

Também é possível determinar a adesividade do ligante betuminoso ao agregado miúdo conforme ABNT - NBR 12584/17. Por ser um procedimento menos usual e por ser o agregado miúdo utilizado na presente pesquisa proveniente da britagem da mesma rocha que produziu os agregados gráudos, este procedimento não foi realizado.

4.1.1.5. Massa específica dos Grãos, Absorção e Massa específica Aparente dos Grãos

Para determinação da massa específica dos grãos, absorção e massa específica aparente dos grãos do agregado gráudo foi empregado a norma do ABNT NBR 6458/84. O ensaio é realizado da seguinte forma: a amostra tem que ser lavada sobre a peneira de 4,8 mm e seca em estufa em temperatura entre 105°C e 110°C. Esperar o resfriamento da amostra à temperatura ambiente

entre 1h e 3h até que permita sua manipulação. Logo após imergir o agregado em água, anotando sua temperatura ambiente, deixar por 24h, tendo o cuidado de agitar algumas vezes para retirada das bolhas de ar do material.

Remover a amostra d'água e espalhá-la sobre um pano úmido que possa absorver, enxugando as partículas uma por uma. Após a secagem superficial determinar a massa da amostra em sua condição saturada da superfície seca e registrar o valor obtido.

Colocar material no recipiente apropriado para amostra, imergi-lo completamente em água potável à temperatura de 24°C variando $\pm 2^\circ\text{C}$. Acoplar o recipiente com a amostra na haste do prato da balança colocada em nível e efetuar a leitura da massa imersa. Secar a amostra em estufa até constância da massa, em temperatura entre 105°C e 110°C e resfria-la em temperatura ambiente entre 1 e 3 horas, para logo em seguida determinar a massa do agregado seco.

Para o agregado miúdo utilizou-se o método da ABNT - NBR 6508/84 é o mais indicado por apresentar melhores os resultados. O ensaio é realizado da seguinte forma: Colocar em um frasco 50 g de amostra e registrar em balança de precisão o valor, em seguida, encher o frasco com água próximo a marca de 500 ml, retirar as bolhas de ar e logo após colocar em um banho com temperatura constante de 21°C. Cerca de 1 h depois completar com água até a marca de 500 ml e determinar a massa total em uma balança de precisão. Conhecida a calibração do frasco, determina-se a sua massa com água à mesma temperatura e procede-se à realização dos cálculos.

A seguir na Tabela 2 apresenta um resumo dos ensaios de caracterização dos agregados realizados e as respectivas normas seguidas.

Tabela 2 - Resumo dos ensaios de caracterização dos agregados

Ensaio	Unidade	Norma
Abrasão <i>Los Angeles</i>	%	DNER-ME 035/98
Absorção (Agregado graúdo)	%	ABNT NBR 6458/84
Adesividade (Agregado graúdo)	-	ABNT NBR 12583/17
Densidade aparente dos grãos (Agregado graúdo)	g/cm ³	ABNT NBR 6458/84
Densidade real (Agregado graúdo)	g/cm ³	ABNT NBR 6458/84
Densidade real (Agregado fino)	g/cm ³	ABNT NBR 6508/84
Índice de forma	%	ABNT NBR 7809/06
Granulometria	%	DNER-ME 083/98

4.1.2. Ligante asfáltico

O DER-SP (2007) em sua Especificação Técnica de Concreto Asfáltico do tipo SMA, recomenda a utilização de asfaltos modificados por polímero do tipo SBS. Nesta pesquisa utilizou-se o ligante asfáltico SBS 60/85, fornecido pelo Grupo Disbral, proveniente de sua filial localizada em Sarzedo – MG.

O SBS é um tipo de Asfalto Modificado por polímeros elastoméricos sintéticos. Seu uso é recomendado para evitar deformações e trincamentos por fadiga proporcionando ao pavimento o prolongamento de sua vida útil, além de ser o recomendado para misturas asfálticas do tipo SMA.

O ponto de fulgor do ligante asfáltico é a maior temperatura na qual os vapores liberados pelo mesmo se misturam com o ar, perto de uma chama e se inflama. Indica a máxima temperatura à qual deve ser aquecido o ligante asfáltico. Seu principal objetivo é garantir a segurança

durante o transporte e manuseio do ligante asfáltico. O ponto de fulgor é normatizado pela ABNT - NBR 11341/90.

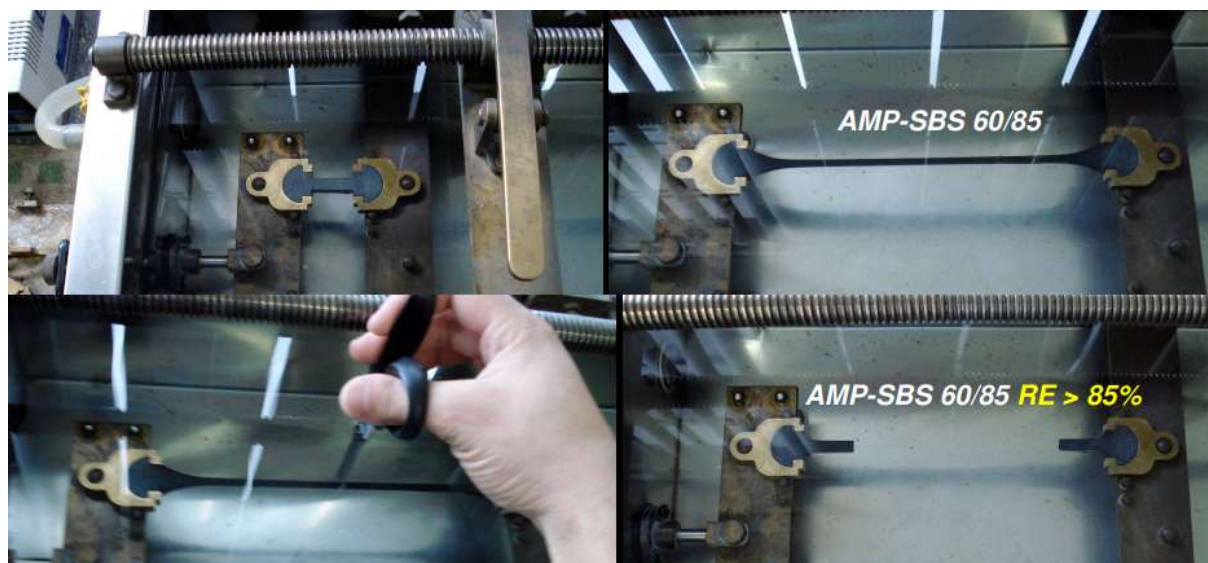
A penetração do ligante asfáltico visa determinar a consistência dos materiais asfálticos através da penetração de uma agulha padrão que penetra verticalmente uma amostra do material asfáltico sob condições especificadas na ABNT - NBR 6576/98. O ensaio padrão consiste em penetrar uma amostra de CAP à temperatura de 25°C com a agulha carregada com 100g de massa, em um tempo de 5s.

ODA e JÚNIOR (2011) relatam que a viscosidade dinâmica (*Brookfield*) têm como função caracterizar a rigidez do asfalto a 135°C, o ensaio é realizado utilizando um viscosímetro rotacional (*Brookfield*), que mede a viscosidade de acordo com o torque que foi necessário para rotacionar uma haste (*Spindle*) imersa na amostra de asfalto quente à uma com velocidade constante. O ensaio é regulamentado pela ABNT - NBR 15184/04.

O ponto de amolecimento do CAP é o valor de temperatura na qual a consistência de um ligante asfáltico passa do estado plástico/semi-sólido para o estado líquido. O ensaio é regulamentado pela ABNT NBR 6560/72.

Bernardes (2011) descreve que o pavimento asfáltico apresenta uma parcela de deformação elástica, se deforma devido à ação do tráfego e necessita de um período para a recuperação elástica ao estado anterior. Já Antunes (2004) relata que a capacidade de recuperação de um CAP, em %, deve-se após o alongamento de 20 cm. A Figura 13 ilustra o ensaio de recuperação elástica realizado com uma amostra de CAP SBS 60/85.

Figura 10 - Ensaio de recuperação elástica



Fonte: ABEDA, 2013

A seguir, na Tabela 3, será apresentada uma descrição das principais características dos cimentos asfálticos utilizados em pavimentação

Tabela 3 - Resumo dos ensaios de caracterização do ligante asfáltico SBS 60/85

Ensaio	Unidade	Norma
Penetração (100 g, 5 s, 25°C)	mm	ABNT NBR 6576/07
Ponto de amolecimento, min	°C	ABNT NBR 6560/16
Ponto de fulgor, min	°C	ABNT NBR 11341/14
Viscosidade Brookfield à 135°C	cP	ABNT NBR 15184/04
Viscosidade Brookfield à 150°C	cP	ABNT NBR 15184/04
Viscosidade Brookfield à 177°C	cP	ABNT NBR 15184/04
Recuperação Elástica a 25°C, 20cm, min	%	ABNT NBR 15086/06

4.2. MISTURA ASFÁLTICA SMA

A metodologia para desenvolvimento da mistura asfáltica do tipo SMA, baseou-se em bibliografias publicadas, de autores como: Leal (2013), Vale (2007) e Normas vigentes, como as do DNIT, e a norma Alemã para determinação da granulometria *ZTV Asphalt*.

4.2.1. Distribuição granulométrica

Para misturas do tipo SMA é fundamental a determinação de uma granulometria ótima para obtenção de um bom desempenho. A Faixa granulométrica escolhida para este trabalho é a estabelecida pela Norma Alemã *ZTV Asphalt* de 0/11S, é conhecida pela presença de agregados com dimensões características maiores, que proporciona ao pavimento uma maior resistência, sendo na prática empregada para vias com maiores volumes de tráfego diário. A Tabela 17 apresenta as faixas granulométricas da especificação alemã.

Tabela 4 - Faixas granulométricas de SMA pela especificação alemã

Peneira (% em massa)	SMA 0/11S	SMA 0/8S	SMA 0/8	SMA 0/5
< 0,09 mm	9 a 13	10 a 13	8 a 13	8 a 13
> 2 mm	73 a 80	73 a 80	70 a 80	60 a 70
> 5 mm	60 a 70	55 a 70	45 a 70	≤ 10
> 8 mm	≥ 40	≤ 10	≤ 10	-
> 11,2 mm	≤ 10	-	-	-

Fonte: DER-PR, 2008.

Por outro lado, segundo Cooley Brown (2001, *apud* Leal 2013), as misturas SMA de menor dimensão máxima (9,5 e 4,8 mm) apresentam menor permeabilidade, para um mesmo percentual de vazios, que as misturas SMA de maior dimensão máxima (12,7 a 25 mm) e por isso são mais duráveis.

4.2.2. Teor ótimo de ligante asfáltico

Após a caracterização dos materiais e escolha da faixa granulométrica é necessário a obtenção do teor ótimo de ligante asfáltico, a fim de se atender as especificações estabelecidas pelas normas específicas. De acordo com a metodologia Marshall, são necessários três corpos de prova para cada teor, variando o percentual de ligante de 0,5 em 0,5%. Os teores adotados para esta pesquisa foram os seguintes: 6,0%, 6,5%, 7,0%, 7,5% e 8,0%.

4.2.3. Adição de fibras

O bagaço de cana-de-açúcar utilizado nesta pesquisa é originário da usina Centroálcool S.A, localizada no município de Inhumas, no estado de Goiás. A usina relata que no pico da safra são utilizadas 6 mil toneladas de cana-de-açúcar por dia, porém a média diária é de 5 mil toneladas, sendo que a produção do etanol é de 92 litros por tonelada.

Sabendo-se que na moagem de 1 tonelada de cana-de-açúcar gera-se 270 kg de bagaço, pode-se chegar à conclusão que são produzidos diariamente na Centroálcool 1.350 toneladas de bagaço de cana-de-açúcar, sendo mensalmente 35.100 toneladas e anualmente 280.800 toneladas de bagaço de cana-de-açúcar.

A fibra utilizada na mistura asfáltica do tipo SMA, estudada nesta pesquisa, é o bagaço de cana-de-açúcar, em substituição à fibra de celulose, com a finalidade de ser um aditivo estabilizante da mistura. Seguindo a metodologia adotada por Cavalcante *et al.* (2017) o material empregado é passado pela peneira com abertura de 2 mm.

A AASHTO T 305/97 estabelece o método para determinar a quantidade de material gotejado em uma mistura asfáltica não compactada mantida em altas temperaturas, com o intuito de facilitar sua produção, armazenamento e transporte, sendo específico para misturas asfálticas SMA e porosas.

O gotejamento ou escorregamento da mistura é a porção de material que se separa da amostra como um todo, podendo este ser um CAP ou combinação de CAP, aditivos e/ou agregado miúdo (VALE, 2007).

O ensaio é realizado a partir de uma amostra, de 1200g podendo variar ± 200 g, de mistura asfáltica em uma cesta de arame posicionada sobre uma superfície lisa de apoio. As amostras juntamente com os acessórios são colocadas em estufa em cerca de 60 minutos, passado o tempo determinado o material é retirado da estufa e pesado. Se a temperatura da amostra apresentar uma diferença superior à 25°C da temperatura ensaiada, o material deve voltar para estufa por 75 minutos.

São necessárias duas determinações de temperaturas diferentes por mistura testada, para verificação das características de escorrimento, uma na temperatura do ligante para mistura e outra na temperatura do ligante para mistura mais 15°C, sendo então possível a análise do

comportamento de misturas asfálticas do tipo SMA, quando no processo de mistura ocorrem variações de temperatura estabelecidos pela norma.

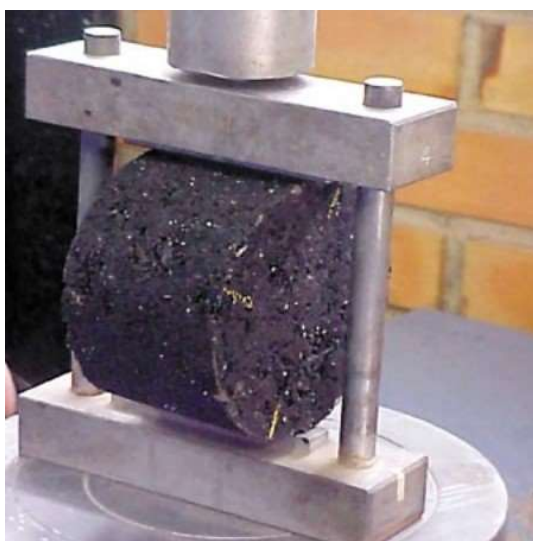
Os parâmetros utilizados para dosagem são os definidos no item 2.4. Dosagem de misturas asfálticas, referenciados pela Norma do DNER 043/95. Os resultados esperados para determinação dos parâmetros são: Volume de vazios, Estabilidade, Fluência, Vazios do agregado mineral e a Relação betume-vazios. A partir desses resultados é determinado qual teor de ligante asfáltico oferece as melhores características de desempenho para a mistura asfáltica.

De acordo com NAPA (2002, *apud* Leal 2013) avaliações de desempenho de pavimentos com SMA pelo NCAT, sugerem que o encontro do teor de ligante asfáltico para produzir uma mistura com percentual de vazios próximo de 4 %, garante proteção contra exsudação e afundamento de trilha de roda, particularmente nos climas temperados.

4.2.4. Resistência à Tração por Compressão Diametral

Para determinação da resistência à tração por compressão diametral, os corpos de prova devem estar à uma temperatura de $25 \pm 0,1^\circ \text{C}$ por 2 horas. Em seguida, posiciona-se cada corpo de prova no molde de ruptura por tração e aplica-se a carga progressivamente, com uma velocidade de deformação de $0,8 \pm 0,1 \text{ mm/s}$, até que se dê a ruptura, por separação das duas metades do corpo de prova. Registra-se a carga de ruptura (F) no ensaio, e o valor da resistência à tração por compressão diametral é calculado (Figura 11).

Figura 11 - Ensaio de Resistência a tração por compressão diametral



Fonte: FATOS & ASFALTOS, n. 108, dez. 2006.

O valor da resistência à tração é obtido através das seguintes equações:

$$\sigma_R = \frac{2F}{\pi DH} \quad (2.1)$$

Onde:

σ_R : resistência à tração, em kgf/cm²;

F: carga de ruptura, em kgf;

D: diâmetro de corpo de prova, em cm;

H: altura do corpo de prova, em cm.

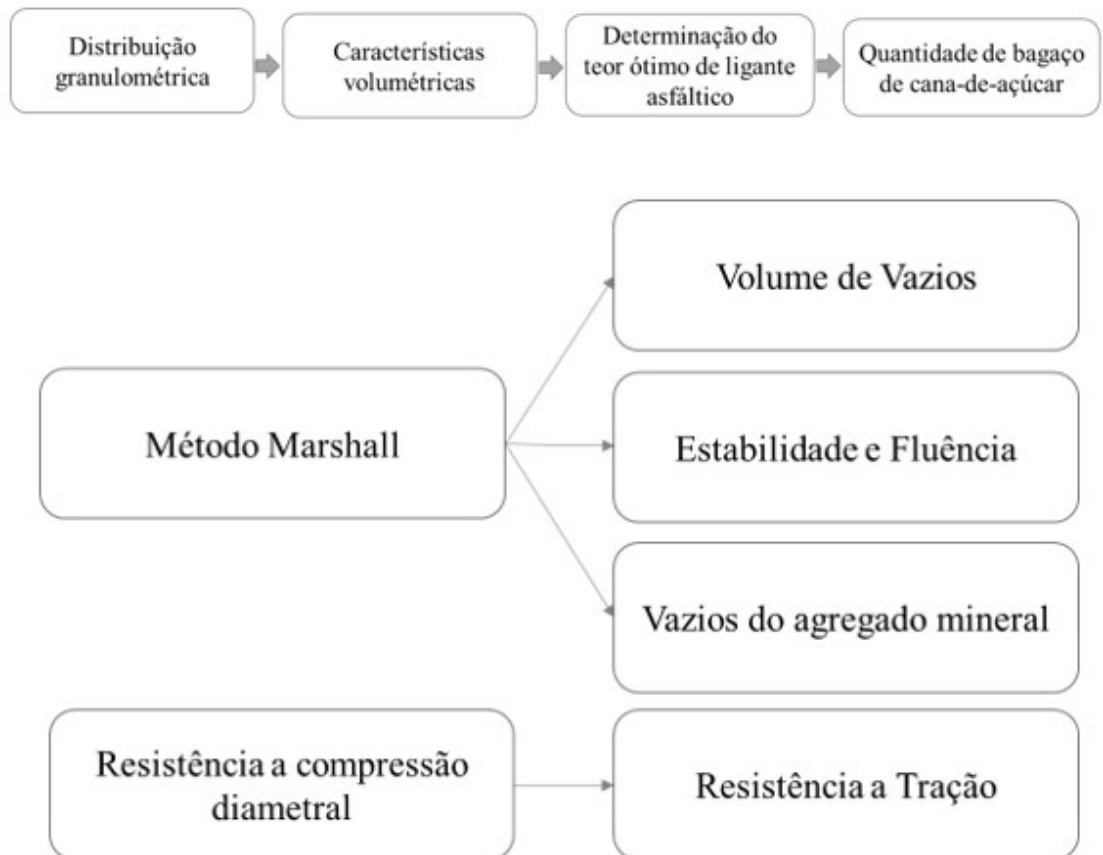
A equação 2.1 presume que o corpo de prova rompe devido às tensões de tração uniformes geradas ao longo do diâmetro pressionado no ensaio de RT, que se igualam à tensão máxima admissível do material, estando em modo elástico durante todo o ensaio.

4.2.5. Definição Final da Mistura SMA

Após a composição da distribuição granulométrica, determinação do teor ótimo de ligante asfáltico e a quantidade de bagaço de cana-de-açúcar necessário, define-se o traço da mistura asfáltica.

O traço é a composição da mistura de projeto, com os parâmetros Marshall ideais para o melhor desempenho. A partir daqui reúne-se cada material em suas porcentagens e molda-se o corpo de prova final, com as características determinadas anteriormente, para determinação da caracterização mecânica na Estabilidade e Fluência pelo método Marshall (DNER 043/95) e para Resistência por Compressão Diametral (DNIT 138/94). Todo esse processo é resumido e exemplificado no fluxograma a seguir (Figura 12).

Figura 12 - Fluxograma da Mistura SMA



CAPÍTULO 5 – RESULTADOS E DISCUSSÕES

Ensaio de laboratoriais têm como objetivo proporcionar um maior entendimento do comportamento dos materiais e misturas em campo, tendo como função reproduzir todas as situações possíveis, como variação da temperatura, carregamento, materiais, execução, entre outros.

Para análise do comportamento físico e mecânico de uma mistura asfáltica do tipo SMA, foram realizados ensaios de caracterização dos materiais, produção da mistura asfáltica por meio do Método Marshall, ensaio de sensibilidade ao escorrimento do ligante asfáltico e a resistência a tração por compressão diametral. Os resultados e as observações obtidas do programa experimental serão explanados a seguir.

5.1. CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

A caracterização dos materiais seguiu os procedimentos determinados pelo Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes – DNIT e pela Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT.

5.1.1. Granulometria

Os ensaios de granulometria seguiram a normativa do DNER-ME 038/98, atualmente DNIT, e as considerações da ABNT NBR 7211/2009, as Figuras 17 e 18 apresentam os materiais separados após o peneiramento. Estas análises granulométricas foram utilizadas na composição da dosagem da mistura asfáltica estudada, ou seja, para realizar o enquadramento da mesma, na faixa granulométrica, neste caso a faixa 11/S de SMA.

Figura 13 - Ensaio de granulometria do agregado graúdo



Figura 14 - Ensaio de granulometria do agregado miúdo



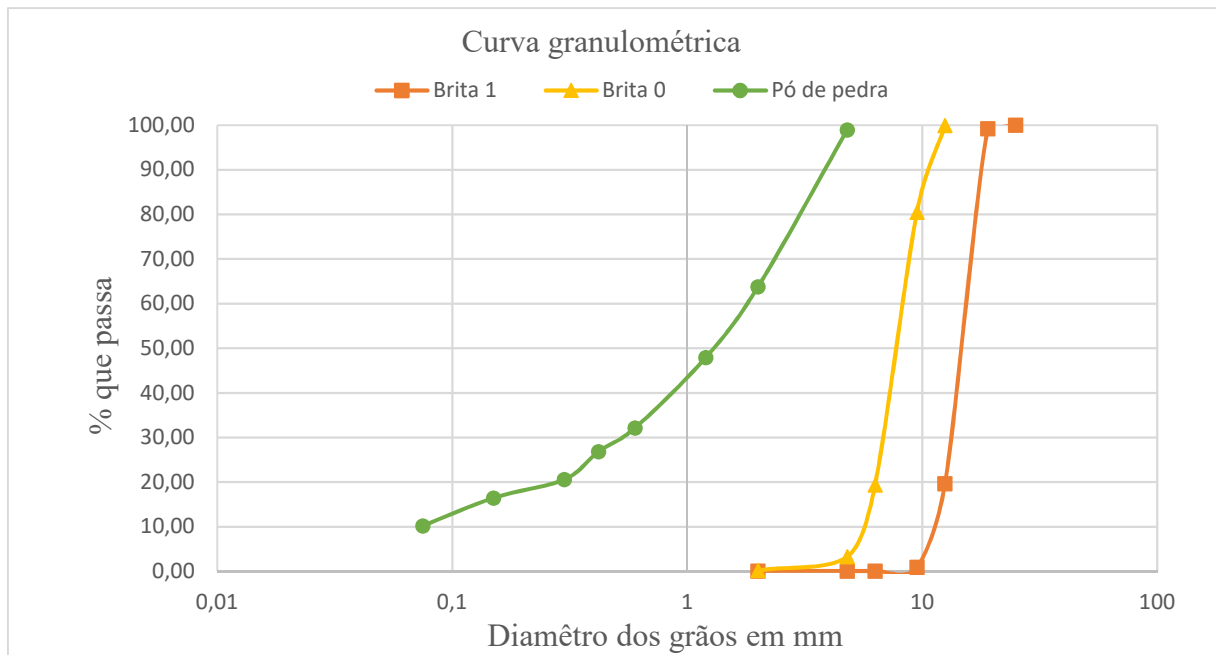
Os resultados dos ensaios de granulometria por peneiramento, realizados com as amostras de agregados graúdo e miúdo (Brita 1, Brita 0 e Pó de pedra, também denominado de Areia Artificial), estão apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 - Granulometria do agregado graúdo e agregado miúdo

Peneiras	Abertura (mm)	% Passa amostra total		
		Brita 1	Brita 0	Pó de pedra
1"	25	100,00	0,00	0,00
3/4"	19	99,23	0,00	0,00
1/2	12,5	19,68	99,92	0,00
3/8	9,5	0,90	80,54	0,00
1/4	6,3	0,10	19,38	0,00
Nº 4	4,8	0,10	3,32	98,97
Nº 10	2	0,10	0,20	63,77
Nº 16	1,2	0,00	0,00	47,95
Nº 30	0,6	0,00	0,00	32,16
Nº 40	0,42	0,00	0,00	26,87
Nº 60	0,3	0,00	0,00	20,60
Nº 100	0,15	0,00	0,00	16,46
Nº 200	0,075	0,00	0,00	10,22
Massa total (g)		10962,08	8437,1	1188,47

As curvas granulométricas dos três agregados estão apresentadas na Figura 15 abaixo:

Figura 15 - Curva granulométrica dos agregados



5.1.2. Desgaste por Abrasão “Los Angeles”

Para determinação da Abração “Los Angeles” o ensaio foi realizado conforme DNER-ME 035/98, na graduação B e pelo equipamento “Los Angeles”, demonstrado na Figura 16.

Figura 16 - Equipamento de Abrasão “Los Angeles”



Na Tabela 5 são apresentados os resultados obtidos no ensaio. Os agregados apresentaram desgaste de 14%, sendo aprovado pela normativa por ter um desgaste inferior a 30%.

Tabela 6 - Desgaste dos agregados por abrasão

Massa seca da amostra inicial (g)	5000
Massa seca da amostra final (g)	4315
Perda por abrasão (%)	14

5.1.3. Índice de forma

Este ensaio foi realizado de acordo com a Norma ABNT NBR 7809/06, (Figura 17) tendo como resultado um índice de forma de 1,4%, atendendo a normativa que estabelece como limite um índice menor ou igual a 3%.

Figura 17 - Paquímetro utilizado no ensaio de índice de forma



5.1.4. Adesividade

Para verificação da adesividade do ligante asfáltico aos agregados foi realizado o ensaio com o agregado graúdo de acordo com ABNT NBR 12583/17. Na Figura 18 observa-se o início do ensaio, onde o ligante asfáltico é misturado ao agregado.

Figura 18 - Mistura do ligante asfáltico ao agregado



Após a total mistura do ligante asfáltico com o agregado e agregado ficar todo envolvido pelo ligante, o mesmo deve ficar em repouso até o seu total resfriamento, conforme a Figura 19 apresenta.

Figura 19 - Repouso dos agregados com ligante asfáltico



Já na Figura 20, o material é colocado em um béquer coberto por água destilada e levado à estufa por 72 horas, na temperatura de 40 °C.

Figura 20 - Material coberto com água destilada



Ao final das 72 horas, o material é retirado da estufa e obtém-se o resultado de forma visual, conforme Figura 21. O ensaio em questão obteve resultado satisfatório por não haver nenhum deslocamento da película betuminosa no decorrer do período em ensaio.

Figura 21 - Material após 72 horas na estufa



5.1.5. Massa específica dos Grãos, Massa Específica Aparente dos Grãos e Absorção

A Figura 22 é demonstrar umas das etapas do ensaio, realizado de acordo com a norma ABNT NBR 6458/84, com amostras de agregado graúdo, Britas 1 e 0.

Figura 22 - Ensaio de absorção e densidade



A Tabela 7 apresenta os resultados dos ensaios de massa específica dos agregados graúdos, Brita 0 e Brita 1.

Tabela 7 - Massa específica dos agregados graúdos

	ρ_s (g/cm ³)	ρ_{ap} (g/cm ³)	S (%)
Brita 0	2,96	2,79	2,11
Brita 1	2,94	2,83	1,22

Para a amostra de agregado miúdo foram seguidas as recomendações da norma ABNT NBR 6508/84. Os resultados encontram-se apresentados a seguir, na Tabela 8.

Tabela 8 - Massa específica agregado miúdo

Pó de pedra	
ρ_s (g/cm ³)	
Média	2,85

5.1.6. Ligante asfáltico

Os resultados dos ensaios de caracterização do ligante asfáltico utilizado nesta pesquisa, SBS 60/85, foram cedidos pelo Grupo Disbral, juntamente com o material. Todos os ensaios feitos em seus laboratórios são certificados e atendem as respectivas normativas existentes. Os resultados obtidos encontram-se apresentados na Tabela 9.

Tabela 9 - Caracterização do ligante asfáltico SBS 60/85

Ensaio	Unidade	Resultado ensaio	Limites
Penetração (100 g, 5 s, 25°C)	mm	41	40 - 70
Ponto de amolecimento, min	°C	80	60
Ponto de fulgor, min	°C	309	235
Viscosidade Brookfield 135°C	cP	1.555	3000
Viscosidade Brookfield 150°C	cP	775	2000
Viscosidade Brookfield 177°C	cP	267	1000
Recuperação Elástica a 25°C, 20cm, min	%	88,00	85

5.1.7. Cal hidratada

Para enquadrar a granulometria na faixa adotada foi necessária a adição de um fíler aos agregados. O fíler utilizado foi a cal hidratada CH III, disponível no mercado. As características da cal hidratada foram retiradas da norma ABNT NBR 7175/11.

5.1.8. Fibras

O preparo do bagaço de cana-de-açúcar consistiu em secar o material, passar na peneira de N° 10 (2 mm) e utilizar a fração passante. A função da fibra em uma mistura asfáltica do tipo SMA é evitar o escorrimento da mistura nos processos de usinagem, transporte e aplicação da mistura.

5.2. PROJETO DA MISTURA ASFÁLTICA SMA

Para avaliar a viabilidade da incorporação do bagaço de cana-de-açúcar na mistura asfáltica do tipo SMA, foi necessária a realização de ensaios baseados em normativas vigentes e em outros trabalhos realizados sobre o assunto.

De posse da caracterização dos agregados e do CAP utilizados, definiu-se a composição granulométrica dos agregados, preparou-se as amostras e realizou-se o Método Marshall para determinação do teor ótimo de ligante e verificação do comportamento da mistura.

5.2.1. Composição Granulométrica

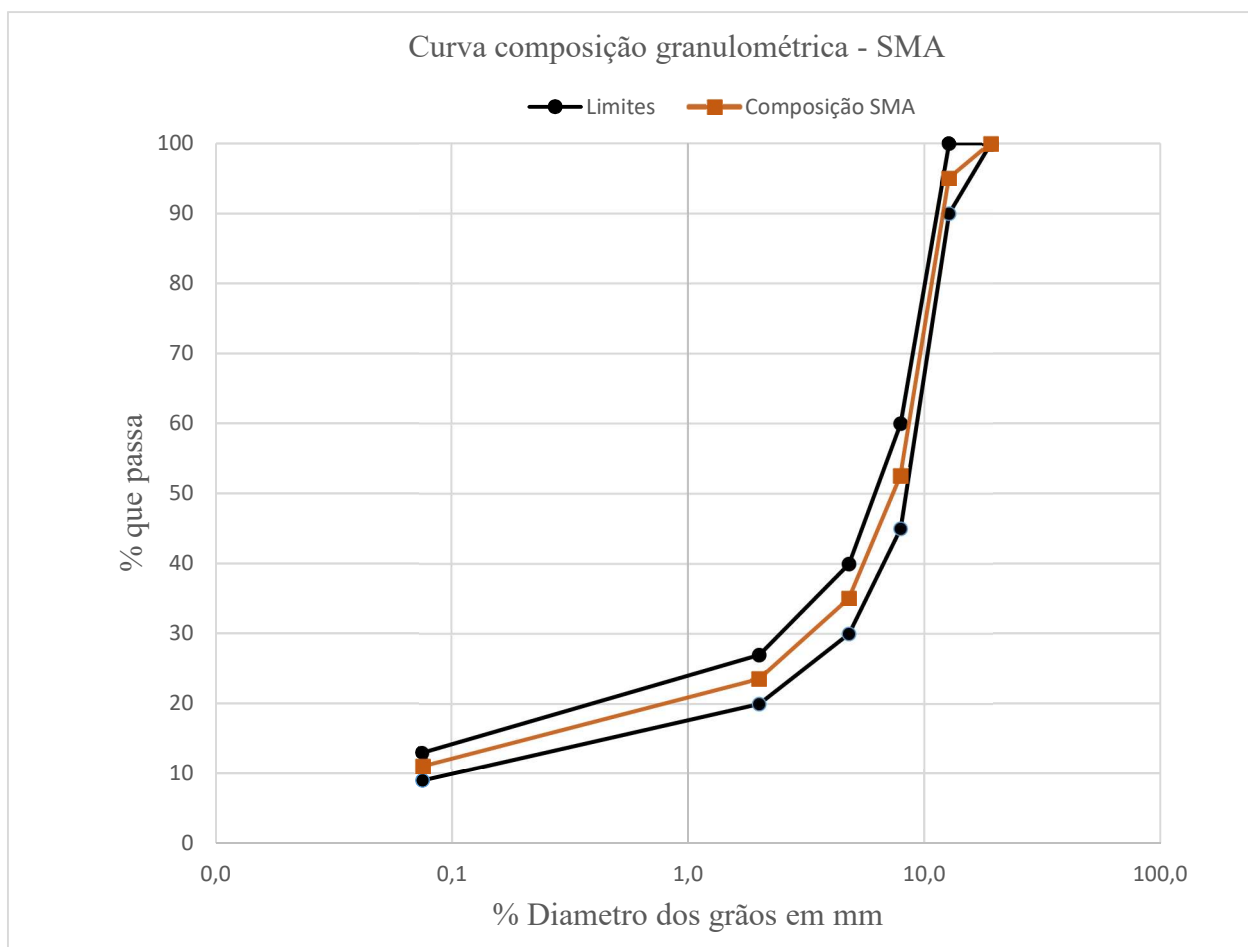
A Faixa I, da norma alemã ZTV Asphalt – StB, para dosagem da mistura asfáltica do tipo SMA, foi escolhida por se tratar de uma faixa indicada para tráfego pesado e solicitações especiais.

Na Tabela 10 é apresentada a composição granulométrica da mistura ou dosagem utilizada e na Figura 23 é apresentada a curva granulométrica resultante da composição granulométrica da mistura ou dosagem estudada. Os materiais foram proporcionados de forma a se obter uma curva granulométrica centralizada na faixa granulométrica estudada.

Tabela 10 - Composição dos agregados

Peneiras	Brita 1	Brita 0	Pó de pedra	Composição	Tolerâncias
3/4"	99,23	100,00	100,0	100	
1/2"	19,68	99,92	100,0	95	± 7%
3/8"	0,90	80,54	100,0	-	± 7%
5/16"	0,51	50,53	100,0	52,5	± 5%
Nº 4	0,10	3,32	98,97	35	± 5%
Nº 10	0,10	0,20	63,77	23,5	± 5%
Nº 200	-	-	10,22	11	± 2%

Figura 23 - Composição granulométrica da Mistura Asfáltica SMA



5.2.2. Método Marshall

Após a determinação da proporção dos agregados na composição granulométrica, foi realizado o método Marshall para determinação do teor ótimo de ligante. Foram realizados testes com teores variando entre 5,0 e 8,5 % e, em função dos resultados, adotados os teores de 6,0 a 8,0% para realização do ensaio completo. Após a escolha dos teores, foram compactados três corpos de prova para cada teor de ligante adotado: 6,0% – 6,5% – 7,0% – 7,5% e 8,0%, a uma temperatura de 145°C, variando 5°C para mais ou para menos.

As Figuras 24 e 25 demonstram parte do processo de moldagem dos corpos de prova. Na primeira a mistura dos agregados, filler, fibra e ligante asfáltico, já na segunda a acomodação da mistura no cilindro para compactação.

Figura 24 - Mistura dos materiais para compor o corpo de prova



Figura 25 - Mistura sendo acomodada no cilindro de compactação



Algumas misturas asfálticas como o SMA, possuem uma característica distinta de compactação em relação às misturas convencionais. São empregados apenas 50 golpes por face em cada corpo de prova, diferentemente das outras misturas convencionais em que usualmente são aplicados 75 golpes por face.

Na Figura 26, os três corpos de prova de cada teor de ligante estão em repouso por 12 horas. Já na Figura 27, os corpos de prova estão em processo de aquecimento no banho termostático (banho Maria), por 30 minutos a 60°C, conforme as recomendações da norma DNER-ME 043/95.

Figura 26 - Corpos de prova em repouso após compactação



Figura 27 - Corpos de prova em banho maria na água por 30 min à 60°C



Após o aquecimento no banho termostático, cada corpo de prova é colocado no molde de compressão, conforme ilustrado na Figura 28, e submetido à compressão diametral com velocidade de 5 centímetros por minuto, até sua ruptura.

Figura 28 - Corpo de prova no molde de compressão antes de romper



Na Tabela 11 são expostos os valores encontrados em cada teor testado. Observa-se que o teor que mais se destaca positivamente é o de 7,0 %, os teores seguintes, de 7,5 e 8,0 % caem drasticamente, sendo o último reprovado. Para o teor de 6,0%, seu resultado é satisfatório, dentro do limite estabelecido como referência.

Tabela 11- Resultados do ensaio de Estabilidade Marshall

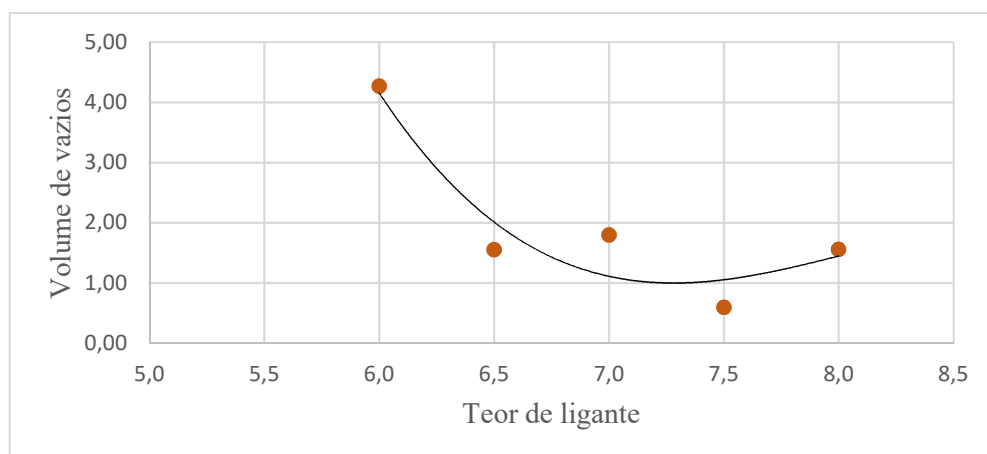
Teor (%)	Estabilidade Média (kN)	Referência (kN)	Fluência Média (mm)
6,0	6,4		5,66
6,5	6,3		6,91
7,0	6,7	$\geq 6,2$	8,93
7,5	6,2		8,68
8,0	5,0		7,78

5.2.2.1. Teor ótimo de ligante

O Departamento de Estradas de Rodagem do Estado de São Paulo através de sua ET-DE-P00/031 determina que o volume de vazios ótimo para as misturas de SMA deve estar compreendido entre 3% e 4%. A Figura 32 apresenta a relação entre o teor de CAP, em percentual e índice de vazios para os cinco teores utilizados.

O teor de CAP que apresentou um volume de vazios de 4,1%, conforme demonstrado na Figura 29, foi o corpo de prova com 6% de CAP. Este teor foi então adotado como o padrão para a realização dos ensaios e determinação de escorrimento e resistência a tração por compressão diametral da mistura asfáltica estudada.

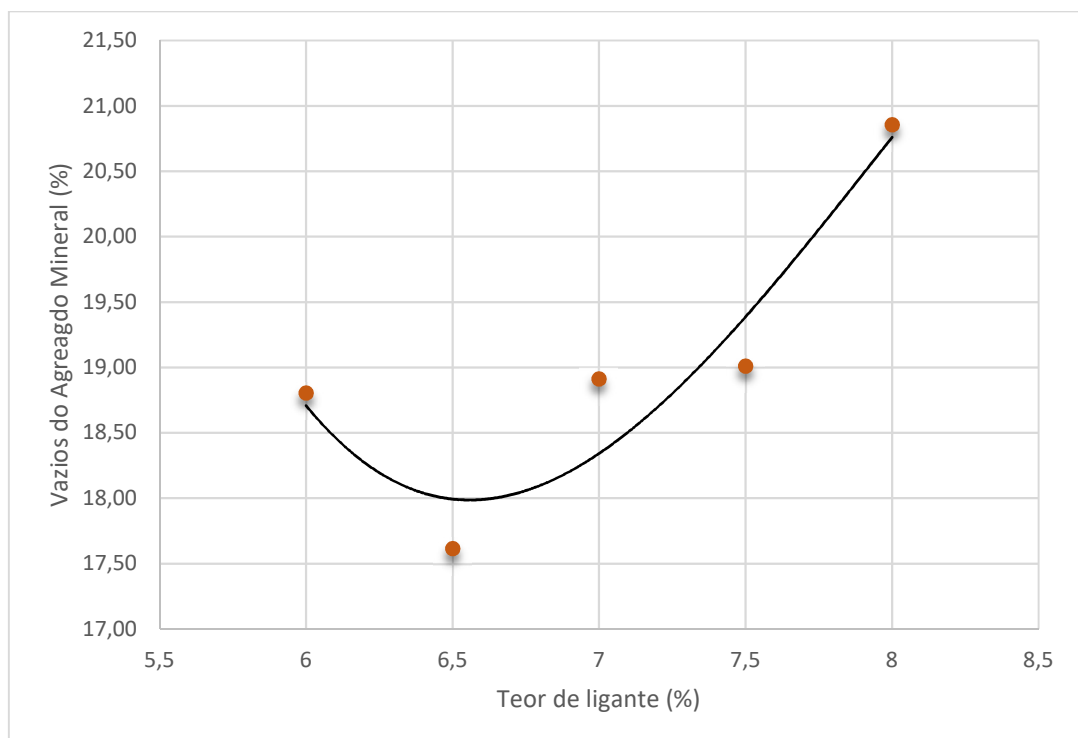
Figura 29 -Volume de vazios em Função do Teor de CAP



A especificação técnica do DER-SP, determina que os Vazios do Agregado Mineral – VAM, para misturas asfálticas do tipo SMA, deve ser ≥ 17 . Esse parâmetro expressa os vazios com ar e/ou preenchidos com CAP.

Observa-se na Figura 30 que todos os teores testados apresentara os vazios do agregado mineral maior que o mínimo estabelecido, sendo de 18,6 %, atendendo, portanto, a este requisito.

Figura 30 - Teor de Ligante x Vazios do Agregado Mineral

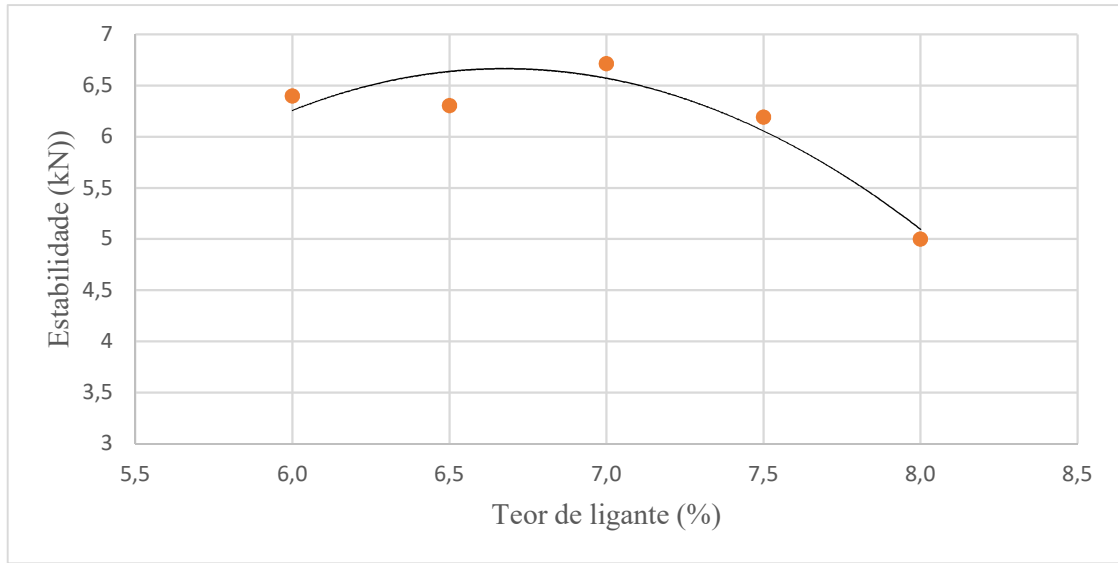


5.2.2.2. Estabilidade Marshall

A estabilidade é dada pela carga média dos três corpos de prova compactados para cada teor de CAP. O valor da fluência é obtido de forma semelhante ao da estabilidade. O NAPA (2002) estabelece um valor mínimo para a estabilidade Marshall que será utilizado referência para as análises do presente trabalho.

A Figura 31 apresenta a relação entre Teor de ligante asfáltico e a estabilidade Marshall. Observando a mesma é possível verificar que há uma boa correlação entre o teor de ligante e a estabilidade e que o teor que corresponde à máxima estabilidade Marshall é igual a 6,0%.

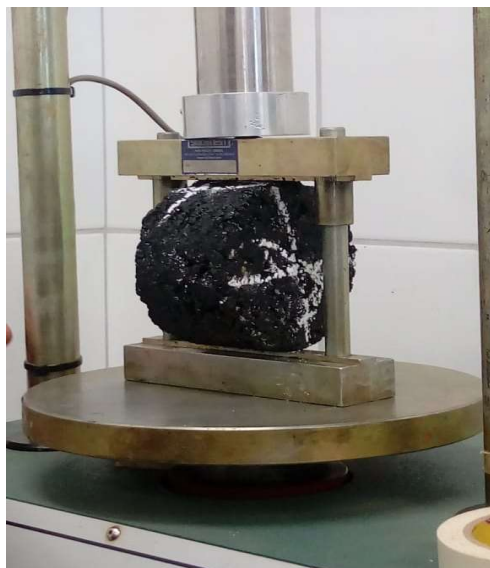
Figura 31 - Teor de ligante x Estabilidade Marshall



5.2.3. Resistência a Tração por Compressão Diametral

Utilizou-se o método do DNIT 136/10 para determinação da Resistência a Tração por Compressão Diametral. Esse ensaio foi realizado com três corpos de prova compactados no Teor ótimo de ligante (6%), a uma temperatura de 25%, correspondente à temperatura ambiente. A Figura 32 apresenta um dos corpos de prova colocado no molde de resistência à tração por compressão diametral. Esse ensaio foi realizado no laboratório de pavimentação asfáltica da Universidade Federal de Goiás – UFG.

Figura 32 - Corpo de prova no molde de compressão para determinação da Resistência a Tração por Compressão Diametral



Na Tabela 12 são apresentados os resultados obtidos do ensaio de Resistência a Tração por Compressão Diametral, realizado com três corpos de prova compactados no teor ótimo de CAP, 6,0%.

Tabela 12 - Resultados do ensaio de Resistência a Tração por Compressão Diametral

Resistência a Tração por Compressão Diametral (MPa)	Média (MPa)	Parâmetro (MPa)
1,25		
1,20	1,2	$\geq 0,6$
1,18		

Observa-se que a média dos resultados encontrados são superiores que o limite estabelecido pelo DER-SP na ET-DE-P00/031.

Portanto, o incremento do bagaço de cana-de-açúcar na mistura asfáltica não interferiu na Resistência a Tração por Compressão Diametral, levando a resultado satisfatório.

5.3. ENSAIO DE SENSIBILIDADE AO ESCORRIMENTO

Dentre os três métodos disponíveis para realização deste ensaio, optou-se pelo método da ASSHTO T 305/97, onde é possível determinar a quantidade de material escorrido de uma mistura não compactada, quando elevada a altas temperaturas.

Na Figura 33 é demonstrado como o material foi levado para a estufa, por 75 minutos a uma temperatura de 165°C.

Figura 33 - Ensaio de sensibilidade ao escoamento



De acordo com a especificação técnica P00/31 do DER-SP, os parâmetros de porcentagem de fibra de celulose podem variar de 0,3 a 1,5% em uma mistura asfáltica do tipo SMA. Com base nesta recomendação e em outras pesquisas citadas no referencial teórico, optamos por uma variação de 3 porcentagens no ensaio, sendo elas: 0,3%, 0,5% e 0,7%. Nas Figuras 34, 35 e 36 respectivamente, são apresentados os resultados visuais do ensaio.

Figura 34 - Escoamento com 0,3% de bagaço de cana-de-açúcar



Figura 35 - Escorrimento com 0,5% de bagaço de cana-de-açúcar

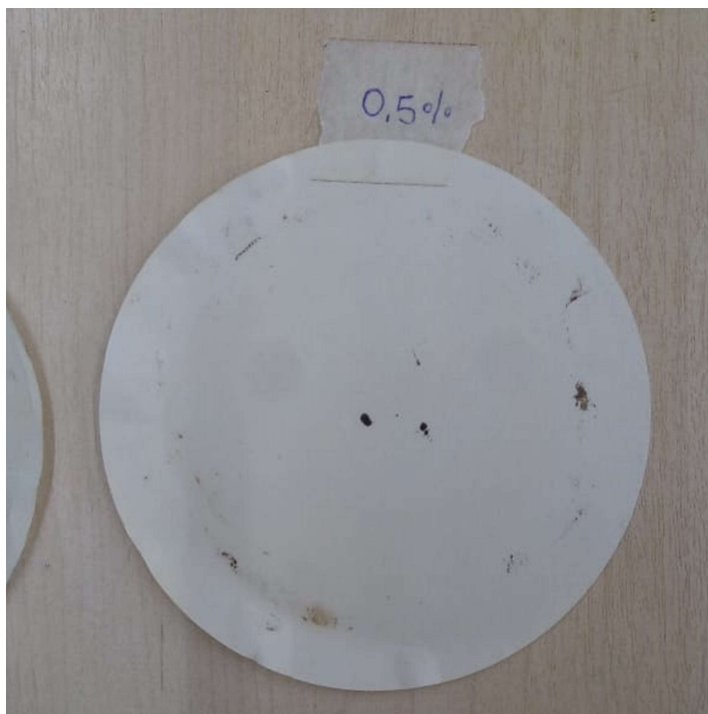
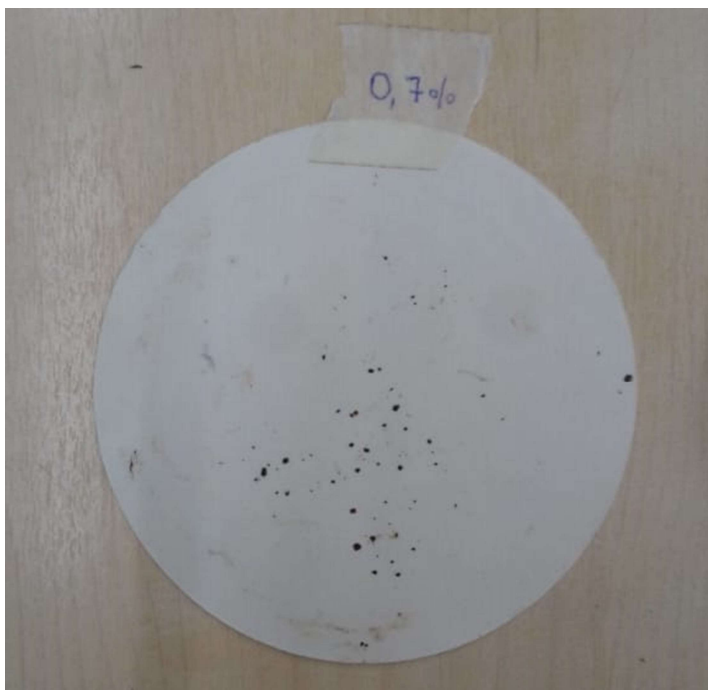


Figura 36 - Escorrimento com 0,7% de bagaço de cana-de-açúcar



Na Tabela 13 são apresentados os resultados do ensaio de sensibilidade ao escorrimento. Observa-se que o limite de escorrimento para uma mistura asfáltica é de 0,3%, e que todos os teores testados se enquadraram neste limite.

Tabela 13 - Resultado do ensaio de escorrimento

Teor (%)	Escorrimento (%)	Limite (%)
0,3	0,0034	0,3
0,5	0,0051	
0,7	0,0025	

CAPÍTULO 6 – CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

Os resultados obtidos nesta pesquisa comprovaram a viabilidade técnica da substituição da fibra de celulose pelo bagaço de cana-de-açúcar na mistura asfáltica do tipo SMA estudada. As principais conclusões sobre o tema proposto, fundamentadas pela literatura e verificadas pelas autoras serão explanadas a seguir.

A adição do bagaço de cana-de-açúcar não provocou nenhuma alteração na trabalhabilidade da mistura asfáltica produzida e nem exerceu influência no processo de realização do ensaio Marshall.

A mistura asfáltica SMA estudada, atendeu a especificação técnica do DER-SP na qual determina um valor máximo de escurimento de 0,3%, indicando um bom comportamento da mesma em relação a esta característica cumprindo sua função, evitar o escurimento da mistura nos processos de usinagem, transporte e aplicação.

Os valores de índice de vazios obtidos para os diversos teores de CAP, foram relativamente baixos, em função da faixa granulométrica adotada e o posicionamento da dosagem no centro da referida faixa, indicando um bom entrosamento dos grãos, tendo seu resultado obtido, entre 3% e 4% de acordo com a norma técnica específica utilizada.

As propriedades mecânicas da mistura asfáltica do tipo SMA estudada, atenderam aos limites especificados por norma com relação ao valor de capacidade de carga mínima (estabilidade Marshall) de 6,2 kN e resistência à tração por compressão diametral (RT) de 1,2 MPa.

Sugestões para pesquisas futuras:

- Avaliar o comportamento da adição do bagaço de cana-de-açúcar em relação às diferentes faixas granulométricas das misturas asfálticas do tipo SMA e verificar se a granulometria influencia no comportamento.
- Avaliar o comportamento das misturas asfálticas do tipo SMA com outros tipos de agregados produzidos da britagem de outros tipos de rocha.

- Avaliar a viabilidade econômica da substituição da fibra de celulose pelo bagaço de cana-de-açúcar.
- Construção de uma pista experimental utilizando uma mistura asfáltica SMA com a adição de bagaço de cana-de-açúcar.

Referências Bibliográficas

- AASHTO – American Association of State Highway and Transportation (1997) T 305 – **Determination of Draindown Characteristics in Uncompacted Asphalt Mixtures.**
- ABEDA, Associação Brasileira das Empresas Distribuidoras de Asfaltos. **Asfaltos modificados por polímeros.** 2013, Maringá, PR. Disponível em: <<http://www.der.pr.gov.br/arquivos/File/EncontrosTecnicos/1encontroTecnico/Porquemodificaroasfalto.pdf>>. Acesso em: 18/11/2018 às 17:00
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS NBR 11341 (1990) - **Produtos de petróleo - Determinação dos pontos de fulgor e de combustão em vaso aberto Cleveland - Método de ensaio.**
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS NBR 12583 (2017) – **Agregado graúdo – Determinação da adesividade ao ligante betuminoso.**
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS NBR 12584 (2017) – **Agregado miúdo – Verificação da adesividade a ligante betuminoso.**
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS NBR 15184 (2004) - **Materiais betuminosos - Determinação da viscosidade em temperaturas elevadas usando um viscosímetro rotacional.**
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS NBR 6458 (1984) - **Grãos de pedregulho retidos na peneira de abertura 4,8 mm - Determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água.**
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS NBR 6560 (1972) - **Determinação do ponto de amolecimento de materiais betuminosos - Método do anel e bola.**
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS NBR 6576 (1998) - **Materiais asfálticos - Determinação da penetração.**
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS NBR 6598 (1984) - **Grãos de solos que passam na peneira de 4,8 mm - Determinação da massa específica.**
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS NBR 7211 (2009) – **Agregados para concreto – Especificação.**
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS NBR 7809 (2006) – **Agregado graúdo - Determinação do Índice de Forma pelo método do paquímetro.**
- ALCARDE, André Ricardo, **Cana-de-açúcar.** 2016, Brasília, DF. Disponível em: <http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/cana-de-acucar/arvore/CONTAG01_108_22122006154841.html>. Acesso em: 08/07/2018 às 19:28.
- ALEMANHA, **Stone Matrix Asphalt – Lothar Drüschner and Volker Schäfer.** Associação Alemã de Asfalto, Berlin, 2005. Disponível em: <<http://www.eapa.org/userfiles/2/DAV/sma%20englversion.pdf>>.
- AMARAL, Simonne da Costa. **Estudos de misturas asfálticas densas com agregados do estado do Pará, utilizando asfalto convencional (CAP-40) e asfalto modificado com polímero SBS (BETUFLEX B 65/60).** São Carlos – SP. 2000.
- ANP, Agência Nacional do Petróleo, Gás natural e Biocombustível. Disponível em <<http://www.anp.gov.br/petroleo-e-derivados2/asfalto>>.
- ANTUNES, Inês. **Caracterização reológica de betumes modificados com sujeitos a envelhecimento artificial.** 2004, Parma, Itália. Disponível em: <<http://www.asphaltrubberitalia.com/wp-content/uploads/2013/05/Giuliani-Antunes-Sousa-CRP04.pdf>>. Acesso em: 17/11/2018 às 16:37.

- BALBO, José Tadeu. **PAVIMENTAÇÃO ASFÁLTICA materiais, projeto e restauração**. 1. Ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2007.
- BERNARDES, David Júnior. **Recuperação de pavimentos flexíveis em áreas de tráfego pesado devido a implantação de lombadas eletrônica**. 2011, Uberlândia, MG. Disponível em: <<http://www.computacao.unitri.edu.br/erac/index.php/e-rac/article/viewFile/539/338>>. Acesso em: 17/11/2017 às 17:18.
- BERNUCCI, L. B.; MOTTA, L. M. G.; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B. **Pavimentação Asfáltica – Formação Básica para Engenheiros**. 2006, Rio de Janeiro, RJ. PETROBRAS, ABEDA.
- BORGES, Paulo Roberto, et al. **Comportamento Mecânico de Misturas Asfálticas a Quente Dosadas pela Metodologia Marshall e Compactadas no Compactador Marshal e no CGS (Compactador Giratório Superpave)**. Rio de Janeiro, 2016, ANPET XXX. Disponível em: <http://www.anpet.org.br/xxxanpet/site/anais_busca_online/documents/4_220_AC.pdf>. Acesso em: 23/03/2018 às 20:36
- BRASIL, CNT, **Transporte Rodoviário: Por que os pavimentos não duram?** Brasília, 2017.
- BRASIL, DNIT, **Manual de Pavimentação**. Brasília, 2006. Disponível em: <http://www1.dnit.gov.br/arquivos_internet/ipr/ipr_new/manuais/Manual_de_Pavimentacao_Versao_Final.pdf>. Acesso em: 17/02/2018 às 02:12.
- BRITO, Lélío Antônio Teixeira. **Avaliação e análise paramétrica do ensaio de compressão diametral sob cargas repetidas em misturas asfálticas**. 2006, Porto Alegre, RS. Disponível em: <<http://livros01.livrosgratis.com.br/cp002465.pdf>>.
- CAVALCANTE, Rodrigo Lima; MARQUES, José Roberto Franco; JUNIOR, José Leomar Fernandes; SUÁREZ, Alex Arancibia. **Mistura asfáltica do tipo SMA produzida com adição de fibras do bagaço de cana-de-açúcar**. 2017, Rio de Janeiro, RJ. Revista de pavimentação
- COELHO, V.; SÓRIA, M.H.A. (1995) **Influência da Granulometria e da Temperatura nas Deformações Permanentes das Trilhas-de-Roda**. 29ª Reunião Anual de Pavimentação, ABPv, Cuiabá, v.2, p.402-431.
- COMPESA, Companhia Pernambucana de Saneamento. **Tabela de Custo Unitários para Obras e Serviços de Engenharia**, 2016. Disponível em: <http://servicos.compesa.com.br/wp-content/uploads/2016/02/TABELA_COMPESA_2016_COM_DESONERACAO_E_SEM_ENCARGO_S_COMPLEMENTARES.pdf>. Acesso em: 21/04/2018 às 22:44
- CONAB, Companhia Nacional de Abastecimento. **Acompanhamento da Safra Brasileira de Cana de Açúcar**. Brasília, 2017.
- DANTAS, Gustavo Henrique Santana. **Estudo do emprego do compactador giratório Superpave na compactação de um solo argiloso**. 2013, São Carlos, SP. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18143/tde-09042013-142246/pt-br.php>>.
- DER PR. **Revestimentos Asfálticos SMA**. 2008. Disponível em: <<http://www.der.pr.gov.br/arquivos/File/EncontrosTecnicos/6encontroTecnico/SMADERPR.pdf>>. Acesso em: 17/02/2018 às 03:19.
- DER SP. **Concreto Asfáltico Tipo SMA**. 2007. Disponível em: <ftp://ftp.sp.gov.br/ftpder/normas/ET-DE-P00-031_A.pdf>. Acesso em: 03/04/2018 às 14:38.
- DNER - Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (1995) ME 043 – **Misturas Betuminosas a quente – ensaio Marshall**.
- DNER - Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (1998) ME 035 – **Agregados – Determinação da abrasão Los Angeles**.

- DNER - Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (1998) ME 083 – **Agregados – Análise granulométrica.**
- DNIT – 136/2010-ME. **Pavimentação asfáltica - Misturas asfálticas – Determinação da resistência à tração por compressão diametral – Método de ensaio.**
- DNIT 138/1994-ME. **Misturas betuminosas - Determinação da resistência à tração por compressão diametral.**
- EL-HAGE, Robert Becerra. **Estudo de mistura asfáltica tipo stonematrixasphalt (SMA) à luz dos compactadores Marshall e Superpave.** 2012, São Carlos, SP. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18143/tde-05092012-163002/pt-br.php>>. Acesso em 14/06/2018 às 21:00.
- ENSINAS, Adriano Viana. **Integração térmica e otimização termoeconômica aplicadas ao processo industrial de produção de açúcar e etanol a partir da cana-de-açúcar.** 2008, Campinas, SP. Disponível em: <http://repositorio.unicamp.br/jspui/bitstream/REPOSIP/264944/1/Ensinas_AdrinoViaAd_D.pdf>. Acesso em: 21/06/2018 às 10:02.
- FALCÃO, MarciusFlaure B.; SOARES, Jorge Barbosa. **Considerações sobre o ensaio de compressão diametral no estudo de materiais de pavimentação.** 2015, Fortaleza, CE. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/267254059_CONSIDERACOES SOBRE O ENSENS DE COMPRESSAO DIAMETRAL NO ESTUDO DE MATERIAIS DE PAVIMEPAVIME>. Acesso em: 08/07/2018 às 20:48.
- FATOS & ASFALTOS. **número 108.** 2006, Aracujá, PR.
- FILHO, Clonilo Moreira Sindeaux de Oliveira. **Estudo do Efeito de Diferentes Granulometrias no Comportamento Mecânico de Misturas Asfálticas Densas Descontínuas Tipo Stone Matrix Asphalt (SMA).** 2007, Fortaleza, CE. Disponível em: <http://repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/1461/1/2007_dis_cmsoliveirafilho.pdf>. Acesso em: 15/06/2018 às 00:21.
- FREITAS, F.J.S. (1996). **Asfalto modificado com EVA.** Anais da 30ª Reunião Anual de Pavimentação, v.1, p.61-74.
- GARDETE, Dinis Correia. **Comparação de ensaios laboratoriais para a caracterização de misturas betuminosas à deformação permanente.** 2006, Coimbra, Portugal. Disponível em: <<https://repositorio.ipcb.pt/handle/10400.11/140>>.
- GARDETE, Dinis; SANTOS, Luís Picado; CAPITÃO, Silvino. **Formulação Volumétrica e Desempenho de Misturas Betuminosas Stone Matrix Asphalt.** 2011, Rio de Janeiro, RJ. Disponível em: <https://repositorio.ipcb.pt/bitstream/10400.11/2241/3/XVICILA_Final_Gar_Pic_Cap_SMA%20%281%29.pdf>. Acesso em: 14/06/2018 às 22:30.
- GOMES, Mayara Souza; HELAL, Adão Marcílio Pedrosa; FILHO, José Carlos. **Análise do comportamento mecânico de um pavimento ferroviário através de um estudo comparativo entre os ensaios de cbr e módulo de resiliência.** 2015, São Luís, MA. Disponível em: <http://sou.undb.edu.br/public/publicacoes/rev._ced_s_n._3__comportamento_mecanico_de_um_pavimento_ferrovuario_-_mayara_gomes_e_adao_helal.pdf>.
- GOUVEIA, Ester Ribeiro; NASCIMENTO, Renata Trajano do; SOUTO-MAIOR, Ana Maria. **Validação de metodologia para a caracterização química de bagaço de cana-de-açúcar.** 2009, Lorena, SP. Disponível em: <http://quimicanova.sbq.org.br/imagebank/pdf/Vol32No6_1500_25-AR08401.pdf>. Acesso em: 21/06/2018 às 10:30.
- JÚNIOR, Márcio Lemos Pinto Coelho & ROCHA, Pedro Henrique Teles, **Estudo Preliminar de Misturas Asfálticas à Quente Utilizadas em Obras de Pavimentação na Região Metropolitana de Goiânia,** 2013. Disponível em:

- <https://www.eec.ufg.br/up/140/o/ESTUDO_PRELIMINAR_DE_MISTURAS_ASF%C3%81LTICAS_%C3%80_QUENTE_UTILIZADAS_EM_OBRAS_DE_PAVIMENTA%C3%87%C3%83O_NA_REGI%C3%83O_METROPOLITANA_DE_GOI%C3%82NIA.pdf>. Acesso em: 24/04/2018 às 21:12.
- LANCHAS, S. (1999). **Características del Stone Mastic Asphalt SMA**. Anais do Congresso Ibero-Latinoamericano – 10º CILA, Sevilha, Espanha, v. 1, p. 727-730.
- LEAL, Cláudio Luiz Dias. **Aproveitamento do bagaço de cana-de-açúcar em misturas asfálticas**. Niterói, RJ, 2013. Disponível em: <http://www.poscivil.uff.br/sites/default/files/dissertacao_tese/teseclaudioformatada1.pdf>. Acesso em: 18/02/2018 às 14:47.
- LEAL, Cláudio Luiz Dias; CASTRO, Protássio Ferreira. **Construção de um Trecho Experimental em SMA usando bagaço de cana-de-açúcar como aditivo, Campos dos Goytacazes**. RJ, 2013. Disponível em: <<http://essentiaeditora.iff.edu.br/index.php/vertices/article/view/1809-2667.20120060/1977>>. Acesso em: 18/02/2018 às 12:14.
- MAGALHÃES, Sidlei Teixeira. **Misturas asfálticas de módulo elevado para pavimentos de alto desempenho**. 2004, Rio de Janeiro, RJ. Disponível em: <http://wwwp.coc.ufrj.br/teses/mestrado/geotecnia/2004/Teses/MAGALHAES_ST_04_t_M_geo.pdf>. Acesso em: 23/11/2018 às 23:01.
- MERHEB, Antonio Hamilton Michel. **Análise mecânica do lastro ferroviário por meio de ensaios triaxiais cíclicos**. 2014, São Paulo, SP. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3138/tde-20052015-160602/en.php>>.
- MOTHÉ, Michelle Gonçalves. **Estudo do comportamento de ligantes asfálticos por reologia e análise térmica**. Rio de Janeiro, 2009.
- MOURÃO, F.A.L. **Misturas Asfálticas de Alto Desempenho Tipo SMA**. Rio de Janeiro, 2013.
- MUGAYAR, André Naletto. Avaliação dos efeitos do tipo de asfalto e da distribuição granulométrica do agregado nas fluências estática e dinâmica de misturas asfálticas densas. São Carlos, 2004.
- NAPA. **Design and construction SMA mixtures - State of the practice**. USA, 1999.
- NASCIMENTO, Luis Alberto Herrmann. **Nova Abordagem da Dosagem de Misturas Asfálticas Densas com Uso do Compactador Giratório e Foco na Deformação Permanente**. Rio de Janeiro, 2008.
- NEVES FILHO, Cláudio Luiz Dubeux. **Avaliação laboratorial de misturas asfálticas SMA produzidas com ligante asfalto-borracha**. São Carlos, 2004.
- NOGUEIRA, Mônica Grassi. **Comparação do comportamento em campo de concretos asfálticos com cap 30-45 e com cap 50-70 para revestimentos de pavimentos**. São Paulo, 2008.
- NOVACANA, **Etanol celulósico: o bagaço da cana-de-açúcar como matéria prima para a hidrólise**. 2013. Disponível em: <<https://www.novacana.com/estudos/etanol-celulosico-bagaco-cana-de-acucar-como-materia-prima-para-hidrolise-241013/>>. Acesso em: 19/02/2018 às 21:15.
- NOVACANA, **Novos horizontes comerciais para o bagaço de cana de açúcar**. 2017. Disponível em: <<https://www.novacana.com/n/industria/tecnologia/horizontes-comerciais-bagaco-cana-de-acucar-160217/>>. Acesso em: 16/02/2018 às 22:49.
- NOVACANA. **A produção de cana de açúcar no Brasil e no Mundo**. 2018. Disponível em: <<https://www.novacana.com/cana/producao-cana-de-acucar-brasil-e-mundo/>>. Acesso em: 16/02/2018 às 22:12.
- ODA, Sandra; JÚNIOR, José Leomar Fernandes. **Borracha de pneus como modificador de cimentos asfálticos para uso em obras de pavimentação**. 2001, Maringá PR. Disponível em: <<http://periodicos.uem.br/ojs/index.php/ActaSciTechnol/article/view/2804>>. Acesso em 18/11/2018 às 13:40

- OLIVEIRA et al. **Decomposição e liberação de nutrientes da palhada de cana-de-açúcar em campo**. 1999, Piracicaba, SP. Disponível em: <<https://seer.sct.embrapa.br/index.php/pab/article/view/5558/2749>>. Acesso em: 21/06/2018 às 11:00.
- ONOFRE, Felipe Coutinho; BESSA, Iuri Sidney; BRANCO, Verônica Teixeira Franco Castelo; SOARES, Jorge Barbosa. **Correlação entre variáveis de densificação do compactador giratório e resistência à deformação permanente de misturas asfálticas convencionais e com resíduos**. 2011. Disponível em: <<https://www.revistatransportes.org.br/anpet/article/view/350/386>>.
- PAVEI, Evelice; ARNS, Pedro; VILLENA, Joe. **Resistência à tração de misturas asfálticas com adição de cinza pesada**. 2014, Criciúma, SC. Disponível em: <<http://repositorio.unesc.net/bitstream/1/3034/1/Evelice%20Pavei.pdf>>. Acesso em: 08/07/2018 às 21:34.
- PINHEIRO, Jorge Henrique Magalhães. **Incorporação de Borracha de Pneu em Misturas Asfálticas de Diferentes Granulometrias (Processos Úmido e Seco)**. Fortaleza, 2004.
- RAMOS, Fábio Rangel Queiroz. **Aplicação de SMA (Stone Matrix Asphalt) em pavimentos aeroportuários – estudo de caso: Aeroporto de Aracaju – SE**. 2015. Ouro Preto, MG. Disponível em: <http://www.nugeo.com.br/uploads/nugeo_2014/teses/arquivos/fabio-rangel.pdf>. Acesso em: 18/02/2018 às 10:16.
- RAMOS, Kleber de Oliveira. **Estudo Sobre Mistura Asfáltica tipo STONE MATRIX ASPHALT (SMA) para pavimento aeroportuário**. 2012, Rio de Janeiro, RJ. Disponível em: <http://transportes.ime.eb.br/DISSERTA%C3%87%C3%95ES/DIS_KLEBERSON.pdf>. Acesso em: 14/06/2018 às 20:40.
- REIS, Rafael Marçal Martins De. **Revestimento asfáltico tipo SMA para alto desempenho em vias de tráfego pesado**. 2002, São Paulo, SP. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3138/tde-14112003-103348/en.php>>. Acesso em: 15/06/2018 às 00:42.
- REKHA K. & RAO B.H. **A Stone Mastic Asphalt is Gap Graded by Using Bagasse Fiber (Sugar Cane)**. Telangana, India, 2017. Disponível em: <http://ijariie.com/AdminUploadPdf/A_STONE_MASTIC ASPHALT_IS_GAP_GRADED_BY_USING_BAGASSE_FIBER_SUGAR_CANES_ijariie7112.pdf>. Acesso em: 07/06/2018 às 10:07.
- RODRIGUES, Luciana Deotti. **A cana-de-açúcar como matéria-prima para a produção de bicomcombustíveis: impactos ambientais e o zoneamento agroecológico como ferramenta para mitigação**. 2010, Juiz de Fora, MG. Disponível em: <<http://atividaderural.com.br/artigos/5601927a79cad.pdf>>. Acesso em: 19/02/2018 às 17:23.
- RONQUIM, Carlos Cesar. **Queimada na colheita de cana-de-açúcar: impactos ambientais, sociais e econômicos**. 2010, Campinas, SP. Disponível em: <<https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/878010/1/Doc77.pdf>>. Acesso em: 21/06/2018 às 10:15.
- SHENG, Yanping. et al. **Effect of Fibers on Mixture Design of Stone Matrix Asphalt**, MDPI, 2017. Disponível em: <<https://pdfs.semanticscholar.org/ab0c/5001dea55faadf1a0ba56b82201db1c8271d.pdf>>. Acesso em: 01/04/2018 às 06:56.
- SILVA, V.L.M.M; GOMES, W.C; ALSINA, O.L.S. **Utilização do bagaço de cana-de-açúcar como biomassa adsorvente na adsorção de poluentes orgânicos**. 2007, Campina Grande, PB. Disponível em: <<http://www2.ufcg.edu.br/revista-remap/index.php/REMAP/article/view/28/64>>. Acesso em: 21/06/2018 às 11:20.
- SOREN, Ranjendra. **Laboratory Investigation of Stone Matrix Asphalt Using Bagasse Fiber**, Rourkela, India. 2012. Disponível em: <http://ethesis.nitrkl.ac.in/3790/1/engg_project_-_Copy_-_Copy.pdf>. Acesso em: 07/06/2018, às 10:49.

TOMÉ, Luisa Gardênia Alves; SOARES, Jorge Barbosa; LIMA, Cícero de Souza. **Estudo do cimento asfáltico de petróleo modificado pelo terpolímero de etileno-butilacrilato-glicilmetacrilato**. 2004, Fortaleza, CE. Disponível em: <http://www.portalabpg.org.br/PDPetro/3/trabalhos/IBP0499_05.pdf>.

UNESP. **Composição do bagaço de cana de açúcar, São Paulo, 2012**. Disponível em: <<http://www.rc.unesp.br/ib/ceis/mundoleveduras/2012/Composi%C3%A7%C3%A3o%20do%20Baga%C3%A7o%20de%20cana-de-a%C3%A7%C3%BAcar.pdf>>. Acesso em: 17/02/2018 às 00:43.

VALE, Aline Colares Do. **Estudo Laboratorial da Viabilidade do Uso de Fibras de Coco em Misturas Asfálticas do Tipo SMA**. Fortaleza, 2007. Disponível em: <http://repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/1445/1/2007_dis_acvale.pdf>. Acesso em: 18/02/2018 às 11:34.

VILVAKUMAR, P. et al. **A Study on the Performance of Sugarcane Fibre in Stone Matrix Asphalt**, Indianápolis, 2013. Acesso em: 09/03/2018 às 03:45.