



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

**MISTURAS ASFÁLTICAS PRODUZIDAS COM FIBRAS DE
BAGAÇO DE CANA UTILIZANDO A METODOLOGIA DE
DOSAGEM SUPERPAVE**

Jackson Hugo Ribeiro Feitosa Batista

Orientadores: Prof. Dr John Kennedy Guedes Rodrigues
Prof^a. Dr^a Ana Maria Gonçalves Duarte Mendonça

Campina Grande-PB, 05 de Dezembro de 2019

**MISTURAS ASFÁLTICAS PRODUZIDAS COM FIBRAS DE
BAGAÇO DE CANA UTILIZANDO A METODOLOGIA DE
DOSAGEM SUPERPAVE**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Campina Grande-PB, 05 de Dezembro de 2019

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS
UNIDADE ACADÊMICA DE ENGENHARIA CIVIL**

JACKSON HUGO RIBEIRO FEITOSA BATISTA

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Universidade Federal
de Campina Grande como requisito
para obtenção do grau de bacharel
em Engenharia Civil.

Área de habilitação: Pavimentação.

Orientadores: Prof^o. Dr^o John Kennedy Guedes Rodrigues
Prof^a. Dr^a Ana Maria Gonçalves Duarte Mendonça

CAMPINA GRANDE – PB

DEZEMBRO/2019

FOLHA DE APROVAÇÃO

JACKSON HUGO RIBEIRO FEITOSA BATISTA

MISTURAS ASFÁLTICAS PRODUZIDAS COM FIBRAS DE BAGAÇO DE CANA UTILIZANDO A METODOLOGIA DE DOSAGEM SUPERPAVE

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado e aprovado em 05/12/2019
perante a seguinte Comissão Julgadora:

Prof^a. Dr^a Ana Maria Gonçalves Duarte
Orientadora
Dr^a em Ciências e Eng. de Materiais - UFCG
Departamento de Engenharia Civil
Centro de Tecnologia e Recursos Naturais
Universidade Federal de Campina Grande

Prof. Dr. John Kennedy Guedes
Orientador
Dr. em Engenharia de Transporte - USP
Departamento de Engenharia Civil
Centro de Tecnologia e Recursos Naturais
Universidade Federal de Campina Grande

Prof^a. Dr^a Carina Silvani
Membro Interno
Dr^a em Engenharia Civil - UFRS
Departamento de Engenharia Civil
Centro de Tecnologia e Recursos Naturais
Universidade Federal de Campina Grande

Loredanna Melyssa Costa
Membro Externo
Doutora em Engenharia de Processos - UFCG
Departamento de Engenharia Civil
UNIFACISA – Centro Universitário

Pedro Henrique da Silva Oliveira
Membro Externo
Doutor em Engenharia de Processos e do Meio Ambiente
Institut National Polytechnique de Toulouse – França
INSTITUTO NACIONAL DO SEMIÁRIDO – INSA

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, pois todas as bênçãos, graças, livramento e passos ao qual venha dar só são possíveis através de ti.

Aos meus pais José Batista da Silva Irmão e Valdeje Maria Ribeiro Feitosa, que sempre fizeram de tudo pra dar uma boa educação e suporte aos seus filhos, ao qual quero um dia retribuir por tudo que fizeram, pois vocês são o alicerce da minha vida.

A meus familiares, amigos e aqueles que pelo destino hoje não fazem mais parte do meu convívio, cada um de vocês foram essenciais para que eu pudesse chegar no fim desse trajetória árdua de muitas abdições e ao olhar pra trás ver o quanto tudo que se passou foi fundamental pra meu crescimento pessoal e profissional.

Em especial a professora Ana Maria Gonçalves Duarte Mendonça pela amizade, orientações e oportunidades no decorrer da graduação no desenvolvimento de pesquisas, sendo isso fundamental para me fazer vislumbrar novos horizontes.

Aos meus amigos de graduação pelos momentos compartilhados e amizades construídas.

Aos colegas de laboratório Jadilson, Ildinho, Conrado e em especial Daniel Beserra pela ajuda e ensinamentos.

Agradeço aos demais professores e funcionários do departamento de engenharia civil da Universidade Federal de Campina Grande.

DEDICATÓRIA

Deus primeiramente por tudo que tenho apreendido e todas as bênçãos concedidas, aos meus pais, demais familiares e amigos pelo apoio e incentivo e a professora Ana Maria Gonçalves Duarte Mendonça pelos ensinamentos, oportunidades e dedicação.

Epígrafe

“O homem não é nada além daquilo que a educação faz dele.”

Immanuel Kant

LISTA DE FIGURAS

Figura 01: Classificação das misturas asfálticas em função da temperatura de usinagem	21
Figura 02: Exemplos de curvas granulométricas de diferentes misturas asfálticas	23
Figura 03: Comparação granulométrica entre mistura convencional e SMA	24
Figura 04: Ligante asfáltico 50/70	32
Figura 05: Fibras do bagaço da cana de açúcar	32
Figura 06: Coleta dos agregados na pedreira Rocha Cavalcante	33
Figura 07: Fluxograma das etapas da pesquisa	33
Figura 08: Viscosímetro rotacional Brookfield	35
Figura 09: Penetrômetro	35
Figura 10: Conjunto anel e bola	36
Figura 11: Compactador Superpave.....	37
Figura 12: Prensa de ensaio de Resistência à Tração	38
Figura 13: Prensa UTM-25 utilizada para ensaio de Módulo de Resiliência	39
Figura 14: Curva granulométrica dos agregados	41
Figura 15: Mistura de projeto delimitada pelas faixas granulométricas da AASHTO – MP 08	42
Figura 16: Curva de viscosidade rotacional (CAP 50/70)	45

LISTA DE TABELA

Tabela 01: Faixas granulométricas para mistura SMA segundo a norma Alemã (ZTV Asphalt – Stb 94)	27
Tabela 02: Requisitos para mistura SMA alemã (ZTV Asphalt – Stb 94)	27
Tabela 03: Faixa granulométrica da norma norte-americana (AASHTO MP 8-02/01)	28
Tabela 04: Propriedades da mistura SMA segunda a norma norte-americana (AASHTO MP 8-02/01)	28
Tabela 05: Granulometria dos agregados	41
Tabela 06: Proporção dos agregados para determinação do teor ótimo	42
Tabela 07: Quantidade dos materiais utilizados para determinar o teor ótimo de CAP 50/70	43
Tabela 08: Massa Específica Real dos Agregados	43
Tabela 09: Viscosidade do CAP x Temperatura	44
Tabela 10: Análise das propriedades obtidas do teor ótimo	46
Tabela 11: Quantitativo dos materiais componentes das misturas asfálticas, com e sem adição de fibras	47
Tabela 12: Ensaio de escorrimento de misturas asfálticas	47
Tabela 13: Resultados do Ensaio de Resistência a Tração	48
Tabela 14: Resultados do ensaio de Módulo de Resiliência	49
Tabela 15: Médias dos resultados do ensaio de Módulo de Resiliência (MR)	49
Tabela 16: Resultados da Estabilidade Marshall	49

LISTA DE SIMBOLOS E ABREVIATURAS

- SMA – Stone Matrix Asphalt
- CAP – Cimento Asfáltico de Petróleo
- CPA – Camada Porosa de Atrito
- UV – Radiação Ultravioleta
- VCAmix – Vazios Totais de Agregado Graúdo
- VCAadc – Vazios Ocupados: com ar requerido + Fibras e Asfalto + Agregados Miúdos
- VAM – Vazios de Agregados Minerais
- AASHTOO – American Association Of State Highway and Transportation Officials
- CONAB – Companhia Nacional de Abastecimento
- DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
- DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
- SHRP – Strategic Highway Research Program
- SUPERPAVE – Superior Performance Pavements
- ESAL – Equivalent Axle Loads
- ANTT – Agência Nacional de Transportes Terrestres
- MR – Módulo de Resiliência
- CP – Corpo de Prova
- RT – Resistência à Tração
- ANP – Agência Nacional de Petróleo
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
- DTA – Análise Térmica Diferencial
- DTG – Análise Térmica Termogravimétrica

RESUMO

O desenvolvimento de pesquisas envolvendo misturas asfálticas é de suma importância para melhoria da qualidade da camada de revestimento rodoviário, pois a cada dia que passa os pavimentos são submetidos a cargas elevadas ao qual não foram projetados, gerando assim deformações permanentes e trincamento por fadiga. Aliando sustentabilidade à economia para execução de pavimento ao aproveitar materiais alternativos, surgindo os modificadores asfálticos que funcionam na melhoria das características do cimento asfáltico de petróleo (CAP) no quesito de retardar o envelhecimento e melhorar o desempenho. Diante disso, esta pesquisa teve como objetivo principal avaliar desempenho de misturas asfálticas tipo SMA (Stone Matrix Asphalt) utilizando fibras do bagaço de cana com comprimento (≤ 20 mm), apresentando, assim, essa mistura uma maior durabilidade e resistência para sua utilização em rodovias de tráfego intenso. Por conseguinte, ao realizar dosagem das misturas asfálticas utilizando a metodologia de dosagem superpave, foi possível realizar ensaios mecânicos para misturas convencionais e do tipo SMA, consequentemente verificar a viabilidade técnica desse tipo de mistura no desempenho do pavimento asfáltico.

Palavras-chave: Pavimentação; Asfaltos Modificados; Desempenho; Viabilidade Técnica.

ABSTRACT

The development of research involving asphalt mixtures is of utmost importance to improve the quality of the road coating layer, as each day the pavements are subjected to high loads to which they were not designed, thus generating permanent deformations and fatigue cracking. Combining sustainability with the economy of pavement execution by taking advantage of alternative materials, emerged asphalt modifiers that work to improve the characteristics of petroleum asphalt cement (CAP) in terms of retarding aging and improving performance. Thus, this research aimed to evaluate the performance of asphalt mixtures type SMA (Stone Matrix Asphalt) using fibers of sugarcane bagasse with length (≤ 20 mm), thus presenting this mixture a longer durability and resistance for use in high traffic highways. Therefore, when performing dosing of asphalt mixtures using the superpave dosing methodology, it was possible to perform mechanical tests for both conventional and SMA-type mixtures, consequently verifying the technical feasibility of this type of mixture on asphalt pavement performance.

Keywords: Paving; Modified Asphalts; Performance; Technical viability.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	14
1.1 JUSTIFICATIVA	16
1.2 OBJETIVOS.....	17
1.2.1 Objetivo Geral.....	17
1.2.2 Objetivos Específicos.....	17
1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO - TCC	18
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	19
2.1 Ligantes Asfálticos	19
2.2 Misturas Asfálticas	21
2.2.1 Classificação das Misturas asfálticas à quente quanto a graduação	22
2.3 Stone Matrix Asphalt (SMA).....	23
2.3.1 Surgimento do SMA.....	23
2.3.2 Misturas SMA: Características Essenciais.....	24
2.3.3 Especificações das misturas do tipo SMA	26
2.4 Fibras naturais como aditivo estabilizador e seu uso em misturas asfálticas	30
2.5 Bagaço de cana-de-açúcar: potencial econômico e sustentável	31
3. MATERIAIS E MÉTODOS	32
3.1 Materiais	32
3.2 Métodos	33
3.2.1 Caracterização física dos agregados graúdos e miúdos	33
3.2.2 Caracterização do CAP 50/70	34
3.2.3 Dosagem de misturas asfálticas	36
3.2.4 Ensaios Mecânicos	38
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	41
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS	51
REFERÊNCIAS.....	52

1. INTRODUÇÃO

A malha viária brasileira, assim como de outros países, carece constantemente de avaliação e renovação devido à deterioração dos pavimentos, notadamente dos pavimentos asfálticos (SANTOS et al.,2018). Os defeitos desencadeados têm origem no mau uso da via, devido a grandes solicitações para as quais o pavimento não foi projetado, na má execução do processo construtivo, no emprego de materiais com propriedades insuficientes para atender à necessidade, nas condições climáticas atuantes e entre outras causas (CRAVO, 2016). Além disso, deve-se destacar que a degradação de um pavimento flexível pode ser gerada entre outros motivos, por: trincamento por fadiga e deformações permanentes excessivas, a qual está ligada às tensões e deformações atuantes na estrutura do pavimento (revestimento asfáltico, base, sub-base e reforço do subleito).

Com isso, se faz necessário o desenvolvimento tecnológico de materiais e soluções para pavimentação, garantindo assim segurança e conforto para aqueles que trafegam nas vias. É nesse contexto que surgem os asfaltos modificados e como alternativa para a melhoria das propriedades dos Cimentos Asfálticos de Petróleo (CAP). A modificação por polímeros tem se mostrado eficaz em vários estudos que vêm sendo realizados (SOBREIRO, 2014; NASCIMENTO, 2015) e quando em serviço.

O CAP é um componente que promove a ligação e impermeabilização de pavimentos, sendo derivado da destilação final do petróleo, ou seja, apresenta característica de um produto orgânico. Entretanto, com o passar do tempo pode perder algumas de suas propriedades reológicas. Este processo de degradação do ligante asfáltico, também conhecido como envelhecimento do ligante asfáltico, verifica-se perante a presença de fatores como: radiação ultravioleta (UV), oxigênio, variações de temperatura e tráfego de veículos. O revestimento, dessa forma, sofre os efeitos da variação de temperatura e da presença de oxigênio, aliados ainda à fatores como solicitação do tráfego de veículos e radiação, todos estes responsáveis por sua degradação (CRAVO, 2016).

De acordo com ROSA JÚNIOR (2015), nas últimas décadas a redução da vida útil dos pavimentos tem impulsionado a busca por cimentos asfálticos de petróleo de melhor qualidade. Sendo assim, a adição de modificadores asfálticos tem a finalidade de melhorar a qualidade do CAP e o desempenho de misturas asfálticas convencionais e do tipo SMA. Entretanto, para que isso ocorra é primordial a compatibilização dos materiais.

A modificação de ligantes asfáltico visa melhorar o comportamento mecânico e, em consequência, o desempenho funcional dos pavimentos, superando algumas desvantagens do ligante puro. Essa técnica pode proporcionar principalmente o aumento da resistência ao acúmulo de deformações permanentes, resistência ao aparecimento de trincas por fadiga e contração térmica. Além disso, retardar o envelhecimento prematuro do CAP e melhorar a interação com os agregados (ROSA JÚNIOR, 2015; GAMA, 2016). Por consequência, buscando aplicar materiais alternativos nas misturas asfálticas do tipo SMA está pesquisa utilizou as fibras do bagaço de cana para tentar avaliar o desempenho e assim mostrar a viabilidade técnica, econômica e sustentável da utilização desse material nas misturas asfálticas.

1.1 JUSTIFICATIVA

Este trabalho tem como princípio dar uma destinação adequada ao resíduo gerado pela atividade de usinagem da cana de açúcar, pois esse material na maioria das vezes é disposto na natureza de forma inadequada, gerando assim impactos ambientais. Em consequência, é importância propor agregar valor diante dos benefícios que o mesmo pode proporcionar a pavimentação.

Assim, busca-se não apenas oferecer uma destinação adequada ao bagaço de cana, mas justificar a importância no desempenho das misturas asfálticas, mostrando um viés econômico tanto na fase de execução como na questão do retardamento das manutenções.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

Este projeto tem como principal objetivo avaliar as propriedades mecânicas das misturas asfálticas produzidas com fibras de bagaço de cana em substituição aos agregados convencionais utilizados e assim comparar com as misturas convencionais.

1.2.2 Objetivos Específicos

- ✓ Obter o teor ótimo de ligante convencional (CAP 50/70) a ser utilizado por fibras de bagaço de cana através da metodologia de dosagem Superpave;
- ✓ Avaliar o comportamento mecânico de misturas asfálticas do tipo SMA com adição de fibras de bagaço de cana, a partir da realização dos ensaios de Resistência à Tração, Módulo de Resiliência e Estabilidade Marshall;

1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO - TCC

O texto deste Trabalho de Conclusão de Curso - TCC encontra-se em um volume único distribuído da seguinte forma:

Introdução – Introdução, Justificativa, Objetivos e Organização da pesquisa.

Fundamentação Teórica – São abordados assuntos relacionados às características dos materiais utilizados, mistura asfáltica do tipo SMA e ensaios mecânicos convencionais utilizados para comprovar a viabilidade técnica da mistura adotada nesse trabalho.

Materiais e Métodos – São apresentados os materiais utilizados na pesquisa e relatados os aspectos considerados importantes sobre os procedimentos da etapa experimental.

Resultados e Discussões – São apresentados os resultados obtidos para os estudos realizados acerca das propriedades mecânicas de misturas asfálticas produzidas com fibras de bagaço de cana em substituição aos agregados (graúdos e miúdos) e assim comparar com as misturas convencionais.

Considerações Finais e Sugestões para pesquisas futuras – São apresentadas as considerações obtidas com base nos objetivos da pesquisa e sugestões para estudos futuros que venham aprofundar o conhecimento sobre o tema.

Por fim, estão as Referências, onde serão listadas as pesquisas citadas neste estudo.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo serão apresentados os assuntos relevantes para o desenvolvimento da pesquisa. Primeiro será realizada uma abordagem sobre os ligantes asfálticos de petróleo, apresentando sua definição e características. Em seguida será realizada uma abordagem sobre as misturas asfálticas à quente do tipo SMA, mostrando suas principais características e vantagens.

2.1 Ligantes Asfálticos

Os asfaltos são uns dos mais antigos materiais empregados na construção devido sua versatilidade, há indícios que seu uso começou em meados de 6000 a.C. Na antiguidade, esse material por possuir características impermeabilizantes e aglutinantes foi usado por diversas sociedades no quesito da construção civil, contribuindo significativamente para o desenvolvimento social. No entanto, a primeira utilização do asfalto na pavimentação ocorreu em Lyon, na França, no ano de 1829, com a utilização de um mastique asfáltico para melhorar as condições de rodagem MANUAL DO ASFALTO (1989, apud MORAES, 2018).

O Manual de asfalto (IA, 1989 versão em português, 2005) lista mais de 100 das principais aplicações desse material, desde a agricultura até a indústria. A pavimentação asfáltica é sem dúvida uma das principais aplicações, sendo uma das mais utilizadas para revestimento na maioria dos países. Segundo BERNUCCI et al. (2008), no Brasil cerca de 95% das estradas pavimentadas são de revestimento asfáltico, além de ser também utilizado em grande parte das ruas.

Diante disso, é importante destacar que são inúmeras as razões pelas quais podemos mencionar a utilização do ligante em revestimentos. De acordo com SOBREIRO (2014), é o que garante a ligação e envolvimento com os agregados, evitando a desagregação causada pelo efeito do tráfego, enquanto sua função impermeabilizante impede a entrada de água, que pode comprometer toda a estrutura do pavimento.

Segundo BERNUCCI et al. (2008), existem definições e conceituações empregadas como referência para o material:

- Betume: comumente é definido como uma mistura de hidrocarbonetos solúvel no bissulfeto de carbono;
- Asfalto: mistura de hidrocarbonetos derivados do petróleo de forma natural ou por destilação, cujo principal componente é o betume, podendo conter ainda outros materiais, como oxigênio, nitrogênio e enxofre, em pequena proporção;
- Alcatrão: é uma designação genérica de um produto que contém hidrocarbonetos, que se obtém da queima ou destilação do carvão, madeira etc.

Os asfaltos podem ser encontrados em jazidas naturais, na forma de bolsões de asfaltos, originados da evaporação natural das frações mais leves (mais voláteis) de jazidas de petróleo localizadas na superfície terrestre. Esse material também pode ser obtido por destilação do petróleo em unidades industriais, refinarias, onde após a remoção dos demais destilados de petróleo é obtido um resíduo que apresenta consistência adequada à pavimentação e é denominado de Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP) (MORAES,2018). Com isso, é importante destacar que o CAP por ser derivado da destilação final do petróleo carrega consigo características de um produto orgânico, por conseguinte perde suas propriedades reológicas. Entretanto, este processo de degradação do ligante asfáltico, também conhecido como envelhecimento, verifica-se perante a presença de fatores como: radiação ultravioleta (UV), oxigênio, variações de temperatura e tráfego de veículos.

Diante disso, de acordo com BATISTA (2017), o processo de oxidação (envelhecimento) do ligante asfáltico pode ser dividido em três estágios principais: usinagem, aplicação e vida útil. Sendo assim, em estudos realizados por MORILHA JUNIOR (2004 apud SANTOS, 2017) a primeira etapa ocorre cerca de 60% do envelhecimento total do ligante; na segunda, cerca de 20%; e na terceira, que ocorre durante a vida útil do pavimento, o envelhecimento é também da ordem de 20%, ocasionado pela ação do meio ambiente.

2.2 Misturas Asfálticas

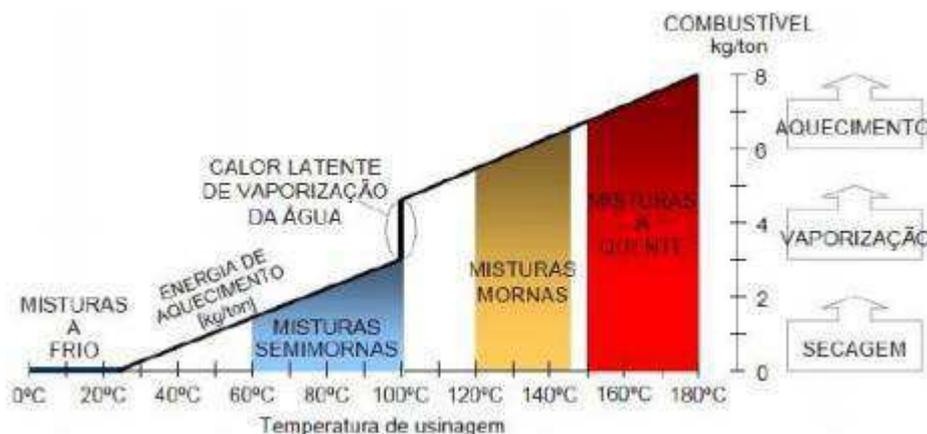
As misturas asfálticas são utilizadas na pavimentação com objetivo resistir diretamente aos carregamentos que são submetidos, sendo assim distribuídas as tensões para as demais camadas que forma o pavimento asfáltico (revestimento, base, sub-base e reforço do subleito). Por consequência, é importante destacar que além das características supracitadas as mesmas tem função de resistir aos efeitos das condições climáticas, garantir conforto, segurança e economia aos usuários.

A classificação dos revestimentos asfálticos utilizados na pavimentação está em consonância com a temperatura de usinagem, sendo assim divididos em:

- Misturas à quente: Utiliza-se ligante asfáltico e agregados minerais aquecidos, com temperatura variando de 150° a 185°C.
- Misturas mornas: Emprega-se temperaturas intermediárias entre às misturas à quente e à frio, sendo diminuída a temperatura dos agregados durante a usinagem.
- Misturas à frio: Os agregados são adicionados a temperatura ambiente no processo de usinagem, sendo bastante utilizado as emulsões asfálticas nessa mistura.

A Figura 01 abaixo ilustra a variação de temperatura para classificação das misturas asfálticas.

Figura 01: Classificação das misturas asfálticas em função da temperatura de usinagem.



FONTE: Motta (2011)

2.2.1 Classificação das Misturas asfálticas à quente quanto a graduação

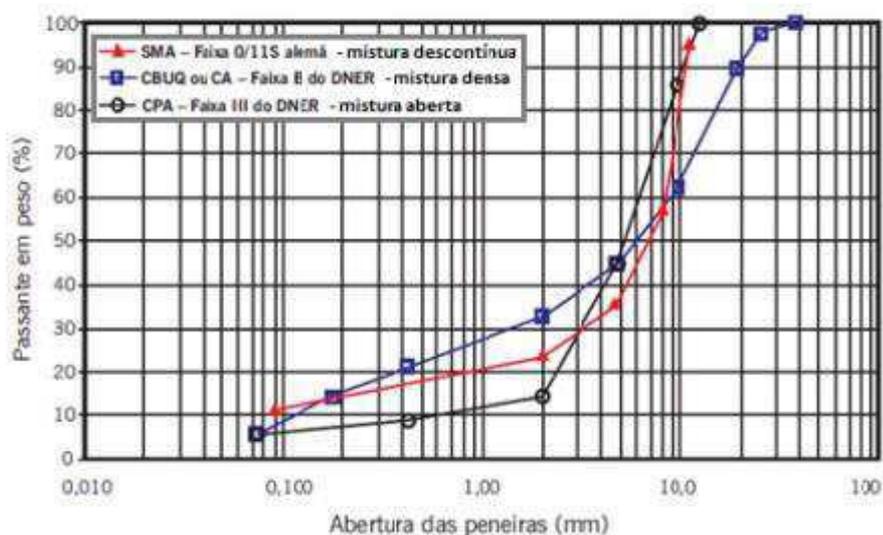
A graduação dos agregados de misturas asfálticas é de suma importância para o bom desempenho do pavimento asfáltico, sendo assim a relevância da relação entre o tamanho dos agregados, principalmente de frações menores, iniciou-se a partir dos estudos de Clifford Richardson em 1906, com a tentativa de determinar o teor ótimo do ligante em uma mistura asfáltica.

O processo de segregação dos agregados é uma das principais falhas aos quais podemos destacar nos pavimentos asfálticos, sendo assim de acordo com BERNUCCI et al. (2008) os defeitos são causados devido as falhas na definição da faixa granulométrica da mistura. Logo, devido ser uma característica bastante importante, a subdivisão da graduação em algumas classes auxilia na distinção dos tipos de misturas asfálticas, sendo assim os tipos comumente utilizados:

- Misturas densas: Possuem curva granulométrica contínua e bem-graduada proporcionando um esqueleto mineral com poucos vazios, visto que os agregados de dimensões menores preenchem os vazios maiores, e.g. concreto asfáltico (CA) (BERNUCCI et al.,2008).
- Misturas abertas: Apresenta curva granulométrica uniforme com agregados quase exclusivamente do mesmo tamanho, de forma que proporcione um esqueleto mineral com muitos vazios (COSTA,2017). Comumente conhecido como mistura asfáltica drenante ou camada porosa de atrito (CPA).
- Misturas descontínuas: Possuem curva granulométrica com proporcionamento dos grãos de maiores dimensões em quantidade dominante em relação aos grãos de dimensões intermediárias, completados por certa quantidade de finos (COSTA,2017).

A Figura 2 ilustra as curvas granulométricas de diferentes misturas asfálticas.

Figura 02: Exemplos de curvas granulométricas de diferentes misturas asfálticas



FONTE: Adaptado de BERNUCCI et al. (2008)

Por fim, as misturas asfálticas descontínuas tendem a ter melhor desempenho em termos de resistência à deformação permanente (devido ao tamanho dos agregados), ao início da fissuração por fadiga e ao desgaste (devido à maior espessura do asfalto), quando comparados com as misturas asfálticas convencionais (NEVES FILHO, 2004).

2.3 Stone Matrix Asphalt (SMA)

2.3.1 Surgimento do SMA

A mistura asfáltica SMA foi concebida na década de 60, tendo como inventor o engenheiro alemão Dr. Zichner, que era gerente do Laboratório Central de Construções Rodoviárias de Strabag Bau AG. Esta teve origem numa tentativa de criar uma mistura asfáltica que resolvesse os problemas no pavimento asfáltico causados pelo uso de pneus com pregos, muito utilizados nos países de clima frio, devido à precipitação de neve (COSTA, 2017). Com isso, deve-se se destacar que na época a mistura asfáltica convencional utilizada, apresentava mástique e pequena porcentagem de agregados graúdos, sendo esse possivelmente um dos fatores redutores da vida útil do revestimento asfáltico. Logo, devido ao elevado custo de manutenção e restauração das

rodovias alemãs na época criou-se forte demanda por uma nova mistura asfáltica, mais forte, que suportaria o tráfego de pneus com pregos (RAMOS, 2012).

Segundo Blazejowski (2010), Zichner acreditava que o agregado graúdo era resistente à fragmentação dinâmica, o que garantiria uma resistência maior à camada de rolamento. Assim, foi proposto uma maior fração de agregados graúdos a mistura para fornecer uma maior resistência ao desgaste provocado pelos pregos nos pneus. Logo, é importante reverenciar que a ideia central da mistura SMA era criar um forte esqueleto pétreo de agregados graúdos com espaços preenchidos por mástique.

2.3.2 Misturas SMA: Características Essenciais

As misturas asfálticas do tipo SMA apresentam características das quais se tornam bastante relevantes no quesito de durabilidade quando comparadas às misturas convencionais. Com isso, é importante destacar a descontinuidade granulométrica dos agregados tornando a mistura mais resistente, devido o maior contato grão/grão da fração graúda que possibilita um melhor intertravamento. Assim, a mistura tem em sua composição basicamente: agregados (gradação descontínua), ligante convencional (CAP), filler e aditivo estabilizador.

O esqueleto de agregados graúdos da SMA proporciona elevada resistência às deformações plásticas em relação às misturas asfálticas contínuas, que são concebidas para apresentar resistência ao cisalhamento baseada no conceito de enchimento de vazios por meio da interação entre grãos de diâmetros variados (BALBO, 2007). A Figura 03 apresenta uma comparação entre as misturas convencional (lado esquerdo) e SMA (lado direito), ilustrando a variação na composição granulométrica dos agregados.

Figura 03: Comparação granulométrica entre mistura convencional e SMA



FONTE: PIERCE (2000)

Diante disso, podemos destacar que de acordo com estudos realizados pelo DNIT, o benefício do investimento em pavimentação utilizando as misturas SMA são bastantes relevantes em longo prazo.

Por conseguinte, esse tipo de mistura por apresentar elevada resistência às deformações plásticas, necessita de pouca intervenção no que diz respeito à restauração, ao qual está ligada às possíveis patologias com: trincamento, desgaste e irregularidade longitudinal. Segundo NAPA (2007), as misturas SMA apresentam:

- Entre 30% e 40% menos afundamento de trilha de roda do que as misturas densas convencionais;
- 3 a 5 vezes maior resistência ao trincamento por fadiga em relação às misturas densas convencionais.

A mistura SMA tem como principais características positivas (MOURÃO, 2003; BLAZEJOWSKI, 2010; EAPA, 1998; BERNUCCI et al., 2008):

- boa estabilidade a elevadas temperaturas – devido ao melhor atrito interno gerado pelo esqueleto mineral entre os agregados;
- boa flexibilidade a baixas temperaturas – devido ao mástique rico em ligante, proporcionando melhores propriedades em relação às misturas tradicionais com relação a trincas térmicas;
- pouca permeabilidade – devido ao baixo índice de vazios, que também tem satisfatória resistência ao envelhecimento, baixa sensibilidade à umidade e alta durabilidade;
- elevada adesividade entre os agregados minerais e ligante – devido à elevada quantidade de filler e as fibras estabilizantes, que tem a função de estabilizar a mistura, engrossando o filme de ligante e melhorando a adesividade agregado/ligante;
- boa resistência à derrapagem e redução do efeito “spray” gerado pelo tráfego em pistas molhadas – devido a boa macrotextura formada pelo agregado graúdo e o mástique na superfície do pavimento;
- melhoria na visibilidade – ao impedir que se forme uma lâmina d’água sobre os pavimentos, o SMA reduz o reflexo dos faróis dos veículos que trafegam no sentido contrário, aumentando a visibilidade da sinalização no pavimento.;

- melhor aderência pneu/pavimento – sua granulometria descontínua forma uma textura superficial que retém a água da chuva, impedindo que a mesma permaneça na superfície de rolamento, favorecendo o contato pneu/pavimento e aumentando a segurança em dias de chuva;
- redução do nível de ruído – devido às propriedades da textura superficial da mistura em relação às misturas asfálticas densas convencionais;
- maior vida de serviço em relação às misturas asfálticas densas contínuas – devido ao aumento da resistência à deterioração da superfície e melhoria da uniformidade / resistência à deformação permanente;

Diante das características apresentadas a mistura SMA pode ser utilizada em revestimentos asfálticos, aos quais vão estar solicitados por um tráfego intenso e cargas elevadas. Sendo assim, uma das saídas para auxiliar na recuperação e manutenção das rodovias brasileiras, pois sua maioria se encontra submetida a carregamento intenso.

Por fim, um dos problemas potenciais ao qual está associado a esse tipo de mistura é o escorrimento e a exsudação (dificuldade em obter a compactação necessária). O teor elevado de ligante causa o escorrimento, e como as temperaturas de usinagem e compactação não podem ser diminuídas, isso continua a ser um dos principais inconvenientes relacionados ao uso da SMA (SOREN, 2012).

2.3.3 Especificações das misturas do tipo SMA

De acordo com BERNUCCI et al. (2008) a primeira especificação a ser publicada como norma foi a alemã, em 1984, e engloba quatro tipos de SMA, denominados de 0/11S; 0/8S; 0/8 e 0/5, sendo o último algarismo referente ao diâmetro nominal máximo do agregado (onde até 10% no máximo ficam retidos em peneira desse tamanho), conforme ilustrado Tabela 01. Para tráfego pesado ou solicitações especiais, as especificações restringem-se as faixas 0/11S e 0/8S. Por conseguinte, as Tabelas 01 e 02 apresentam as especificações da norma alemã ZTV Asphalt – StB 94 (2001).

Tabela 01: Faixas granulométricas para mistura SMA segundo a norma Alemã (ZTV Asphalt – Stb 94)

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

FONTE: COSTA (2017)

Tabela 02: Requisitos para mistura SMA alemã (ZTV Asphalt – Stb 94)

Características e Requisitos				
Tipo de asfalto ¹	B65 ou PmB45	B65 ou PmB45	B 80	B80 ou B20
Teor de asfalto na mistura, % em peso	> 6,5	> 7,0	> 7,0	> 7,2
Fibras na mistura, % em peso	0,3 a 1,5			
Dosagem	Marshall (50 golpes por face)			
Temperatura de compactação, °C	135°C ± 5°C (para PmB deve ser 145°C ± 5°C)			
Volume de vazios, %	3,0-4,0	3,0-4,0	2,0-4,0	2,0-4,0
Camada de rolamento				
Espessura, mm	35-40	30-40	20-40	15-30
Consumo, kg/m ²	85-100	70-100	45-100	35-75
Camada de nivelamento				
Espessura, mm	25-50	20-40	-	-
Consumo, kg/m ²	60-125	45-100	-	-
Grau de Compactação	> 97%			
Volume de vazios da camada compactada	< 6,0%			

FONTE: COSTA (2017)

Com o resultado positivo na aplicação de revestimentos asfálticos na Alemanha, a mistura SMA foi disseminada em outros países, os quais criaram suas próprias especificações adaptando a norma alemã para sua realidade. Sendo assim, as recomendações da norma norte-americana AASHTO MP 8-02/01 dispõem três faixas granulométricas, conforme ilustrado na Tabela 03. As propriedades da mistura são ditadas por especificações, mostradas na Tabela 04, oriundas do equipamento de compactação giratória SUPERPAVE.

Segundo BERNUCCI et al. (2008) as faixas com diâmetro nominal máximo de 19mm e 12,5mm são as mais empregadas nos Estados Unidos. A faixa com tamanho nominal máximo de 9,5mm tem sido a adotada recentemente e há uma tendência de aumentar seu emprego nos próximos anos.

Tabela 03: Faixa granulométrica da norma norte-americana (AASHTO MP 8-02/01)

Abertura (mm)	Faixas					
	Porcentagem em massa, passando					
	19 mm		12,5 mm		9,5 mm	
	mín	máx	mín	máx	mín	máx
25		100	-	-	-	-
19	90	100	-	100	-	-
12,5	50	88	90	99	-	-
9,5	25	60	50	85	100	100
4,75	20	28	20	40	70	95
2,36	16	24	16	28	30	50
1,18	-	-	-	-	20	30
0,6	-	-	-	-	-	21
0,3	-	-	-	-	-	18
0,075	8	11	8	11	-	15

FONTE: COSTA (2017)

Tabela 04: Propriedades da mistura SMA segunda a norma norte-americana (AASHTO MP 8-02/01)

Propriedades	Requisito para corpos-de-prova compactados no equipamento giratório - SUPERPAVE
Volume de vazios (%)	4,0 ²
VAM (vazios no agregado mineral), % mín	17
VCAmix ³	< VCA _{drc} ³
Estabilidade Marshall, N, mín	6200 ⁴
RRT -Resistência à tração retida (AASHTO T 283/1989), % em peso máx	70
Teste de escorrimento (draindown) na temperatura de produção ⁵ , % em peso máx.	0,3
Teor de asfalto na mistura, % mín	6

FONTE: COSTA (2017)

² Locais com clima frio o projeto pode ser realizado para 3,5% de volume de vazios.

³ VCAmix – Vazios totais do agregado graúdo. VCA_{drc} – Vazios ocupados: com ar requerido + fibras e asfalto + agregados miúdos.

⁴ Valor sugerido (Prática).

⁵ Escorrimento de acordo com as especificações da norma AASHTO T 305-97.

No Brasil ainda não foi criada uma norma regulamentadora no quesito de misturas asfálticas do tipo SMA. Sendo assim, é importante destacar que o primeiro uso em camadas de revestimento no país foi a construção da pista do autódromo de Interlagos em São Paulo em fevereiro de 2000 (Beligni et al.,2000).

O Departamento de Estradas e Rodagens do estado de São Paulo propôs, em 2006, uma normalização técnica de camada de rolamento de SMA com o objetivo de definir os critérios para orientar os processos de produção, execução, aceitação e medição dos serviços de mistura asfáltica tipo SMA em obras rodoviárias. A especificação entrou em vigor no ano de 2007, com o nome ET-DE-P00/031 – Concreto Asfáltico tipo SMA, e discorre sobre os materiais que devem compor a mistura SMA, equipamentos, execução, controle, aceitação e critérios de medição e pagamento (COSTA,2017). Por consequência, as orientações da norma supracitada no quesito dos materiais constituintes da mistura são: agregados graúdos e miúdos, material de enchimento, fibras de celulose e ligantes modificados com polímeros.

As fibras são geralmente orgânicas (de celulose) ou minerais, e são adicionadas durante a usinagem para evitar a segregação da mistura em seu transporte, facilitar a aplicação e evitar o escorrimento do ligante asfáltico (NAPA, 2002). Sendo assim, as fibras orgânicas podem ser adicionadas a mistura também em pellets ou agregações. Em alguns casos vêm impregnadas de ligante asfáltico para facilitar sua abertura na usinagem, contendo em geral 1:2 de ligante para fibras.

É importante destacar que uma prática bastante disseminada em pesquisas é a utilização de ligantes convencionais, ou seja, não há regulamentação na aplicabilidade do CAP modificado ou não na mistura.

Segundo BERNUCCI et al. (2008), os agregados em praticamente todos os países são obrigatoriamente 100% britados, com esparsas exceções. Segundo a AASHTO D 5821, deve haver 100% de agregados britados em pelo menos uma face e 90% em duas faces. Tanto norte-americanos, como os alemães, têm especificado abrasão Los Angeles \leq 30% (AASHTO T 96), porém há casos de sucesso com agregados britados cuja abrasão excedeu 50%. A

forma dos agregados é de preferência cúbica. A absorção deve ser $\leq 2\%$ pela AASHTO T 85; o ataque aos sulfatos de sódio $\leq 15\%$ após 5 ciclos, e de magnésio $\leq 20\%$, conforme AASHTO T 104.

2.4 Fibras naturais como aditivo estabilizador e seu uso em misturas asfálticas

As misturas do tipo SMA por apresentar um teor de ligante (CAP) considerável (6 a 8%) necessitam de algum material estabilizante para evitar a segregação ou exsudação durante o processo de mistura e espalhamento, sendo assim a alternativa comumente utilizada é a aplicação de fibras naturais para evitar futuras patologias nas camadas de revestimento. Logo, as misturas asfálticas modificadas por adição de fibras têm seu estudo entrelaçado com a teoria de materiais compósitos (SOUZA,2010). Com isso, é importante destacar que as fibras utilizadas não produzem alteração química na mistura, segundo SANTANA et al. (2018) ao realizar ensaios termogravimétricos (DTA/DTG), mas suas propriedades físicas são alteradas ao permitir um aumento no teor de asfalto aplicado na produção de camadas de rolamento.

Diante disso, o que se verifica na literatura é que as fibras naturais utilizadas nas misturas asfálticas são dos mais diversos tipos de materiais, sendo comumente utilizada fibras celulósicas (COSTA,2017; ANTUNES, 2014; SANTANA *et al.*,2018). O que se verifica de acordo com Vale (2007) é que as fibras de celulose apresentam vantagens em relação aos minerais por serem totalmente inócuas à saúde e serem produzidas a partir de fontes renováveis.

Segundo BLAZEJOWSKI (2011) a diferença entre as fibras está no seu poder de absorver ligante, onde atualmente as fibras de celulose são conhecidas por possuir a maior eficiência de absorção e maior capacidade de atenuar o escorrimento. Por consequência, a de se destacar que o uso de fibras naturais é uma solução altamente viável do ponto de vista econômico e sustentável por ser: biodegradável, atóxico, fonte renovável e baixo custo.

2.5 Bagaço de cana-de-açúcar: potencial econômico e sustentável

A cana-de-açúcar é uma gramínea originária da Ásia, cultivada em países tropicais e subtropicais, usada para produção de açúcar e álcool (MACHADO, 2005). Com isso, foi trazida para o Brasil pelos portugueses no período colonial, ao qual teve importância econômica para o país. Inicialmente, seu principal polo de produção era a Zona da Mata nordestina, expandindo-se depois para região Sudeste, especialmente no estado de São Paulo (KAWABATA, 2008).

De acordo com dados da Conab (2018) a área estimada para produção de cana-de-açúcar é de 8,61 milhões de hectares, sendo obtido assim na safra 2018/19 625,96 milhões de toneladas. O que se pode vislumbrar ao ter dados assim, é o tamanho do impacto ambiental causado pelo bagaço de cana excedente que não é aproveitado nas caldeiras de usinas produtoras de açúcar e álcool, ao qual estimasse um valor aproximadamente de 20%, motivando assim está pesquisa na tentativa de mostrar sua viabilidade nas misturas asfálticas por consequência agregar valor a esse resíduo.

O bagaço de cana-de-açúcar é um subproduto gerado após a produção do açúcar e do álcool, ao qual gera cerca de 270 quilogramas de bagaço por tonelada de cana moída. A maior parte do bagaço é queimada nas caldeiras das usinas para produção de energia térmica ou elétrica, tornando a indústria sucroalcooleira uma das únicas a ser produtor e consumidor de energia renovável (CASTRO et al., 2013).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Materiais

Os materiais usados na pesquisa foram:

Ligante asfáltico

O ligante asfáltico usado na pesquisa foi doado pela empresa JBR Engenharia LTDA, classificado como CAP 50/70, convencional, conforme ilustrado na Figura 04.

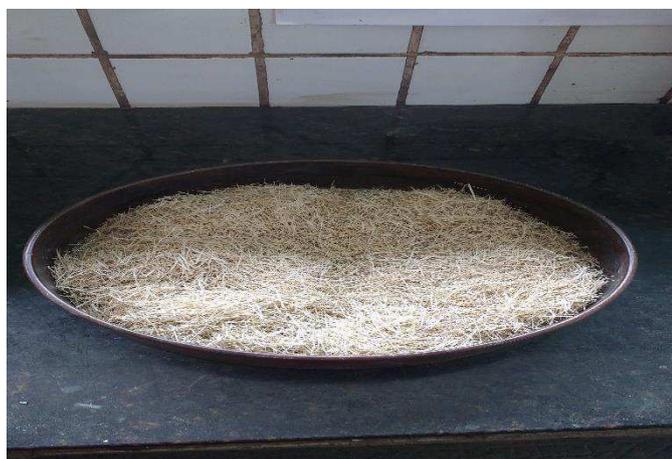
Figura 04: Ligante asfáltico 50/70



Fibras do bagaço da cana de açúcar

A obtenção das fibras (comprimento ≤ 20 mm) foi através do trabalho manual desfiando esse insumo proveniente do bagaço de cana de açúcar obtido na Feira Central de Campina Grande – PB, que estava sempre submerso em água a temperatura ambiente.

Figura 05: Fibras do bagaço da cana de açúcar



Agregados naturais

Os agregados utilizados nessa pesquisa foram brita 19mm e 9,5mm (agregados graúdos) e o pó de pedra (agregado miúdo) oriundos da Pedreira Rocha Cavalcante – PB, localizada na cidade de Campina Grande – PB. O fíler (cal hidratado) utilizado na pesquisa foi comprado no comércio local.

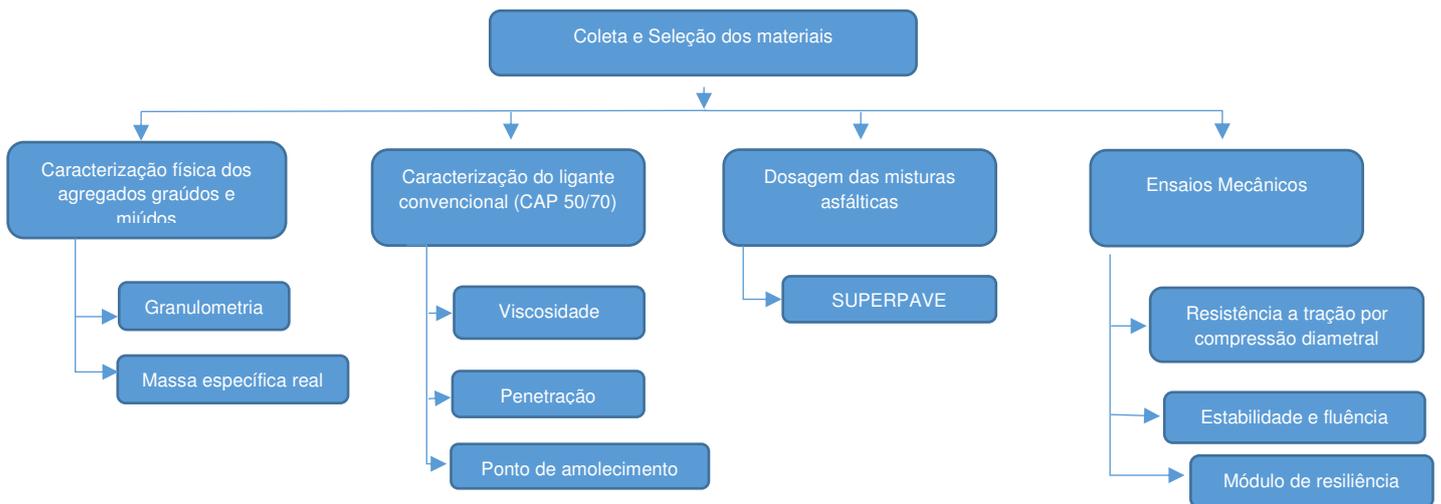
Figura 06: Coleta dos agregados na pedreira Rocha Cavalcante



3.2 Métodos

A Figura 07 ilustra o fluxograma das etapas da pesquisa.

Figura 07: Fluxograma das etapas da pesquisa



3.2.1 Caracterização física dos agregados graúdos e miúdos

3.2.1.1 Análise granulométrica

O ensaio de granulometria determina a distribuição percentual dos diferentes tamanhos dos grãos do agregado. Sendo assim, representada pela curva de distribuição granulométrica acumulada que mostra o percentual de material passante na peneira versus logaritmo do diâmetro da abertura da peneira. O ensaio de composição granulométrica para o agregado graúdo e agregado miúdo foi realizado segundo o método de ensaio prescrito na DNER - ME 083/98.

3.2.1.2 Determinação da massa específica real e absorção

A massa específica real dos agregados é a relação da massa e o seu volume, não considerando os vazios permeáveis da água. A importância desse ensaio está no cálculo do consumo dos materiais a serem determinados na dosagem das misturas asfálticas. A determinação da massa específica real dos agregados graúdos e miúdos foi obtida seguindo as orientações das normas DNER – ME 081/98 e DNER – ME 084/95.

O ensaio de absorção é um método que busca avaliar o aumento de massa de agregado, devido ao preenchimento por água de seus vazios permeáveis, expresso como porcentagem de sua massa seca. Logo, esse método segue as recomendações da norma DNER – ME 081/98.

3.2.2 Caracterização do CAP 50/70

3.2.2.1 Viscosidade Rotacional

O ensaio de viscosidade rotacional permite medir as propriedades de consistência do asfalto relacionadas ao bombeamento e à estocagem através da resistência ao giro de um spindle, sendo realizado a altas temperaturas, 135°C, 150°C e 177°C, conforme a NBR 15184/2004 e a ASTM D4402-15. Por outro lado, contribui significativamente na definição das temperaturas de usinagem e compactação do asfalto. O viscosímetro rotacional utilizado foi o Brookfield, modelo DV-III ULTRA, acoplado a um controlador de temperatura THERMOSEL, ilustrado na Figura 08, além de spindles para a amostra do CAP convencional.

Figura 08: Viscosímetro rotacional Brookfield



3.2.2.2 Penetração

O ensaio de penetração é utilizado para medir a profundidade, em décimo de milímetro, que uma agulha de massa padronizada (100 g) penetra verticalmente numa amostra de ligante, por 5 segundos, à temperatura de 25°C. Em cada ensaio, são realizadas cinco medições individuais de penetração ao qual retira-se a média e o valor é aceitável se a diferença entre as cinco medições não exceder um limite especificado em norma, sendo também normalmente utilizado como uma medida indireta da viscosidade. Com isso, a norma que regulamenta as etapas do ensaio é DNIT-ME 155/2010, sendo realizado com o equipamento ilustrado na Figura 09.

Figura 09: Penetrômetro



3.2.2.3 Ponto de Amolecimento

O ensaio de ponto de amolecimento (anel e bola) é utilizado para verificar a temperatura a qual o ligante asfáltico está susceptível a condição de escoamento, sendo assim as amostras ilustradas na Figura 10 deve atingir a placa de referência inferior da aparelhagem. Logo, a diferença de temperatura do ensaio verificada não deve ter uma discrepância entre si de mais de 1°C, seguindo as orientações da norma DNIT-ME 131/2010.

Figura 10: Conjunto anel e bola



3.2.3 Dosagem de misturas asfálticas

3.2.3.1 Método de dosagem Superpave

Nos Estados Unidos, no final da década de 1980 e início da década de 1990, as limitações dos métodos de dosagem tradicionais motivaram o desenvolvimento do programa SHRP (Strategic Highway Research Program). O objetivo do SHPR era melhorar os métodos de ensaios e especificações para ligantes e misturas asfálticas sob uma abordagem de desempenho do pavimento. A partir desses estudos surgiu o sistema Superpave (Superior Performance Pavements) que aborda um novo sistema de seleção e especificações de ligantes asfálticos.

Figura 11: Compactador Superpave



O projeto de misturas asfálticas do Superpave foi dividido em três níveis em função do tráfego. O Nível 1 é para tráfego com carga de eixo equivalente (ESAL – Equivalent Axle Loads) menor que 10^6 e requer apenas a avaliação dos parâmetros volumétricos dos corpos de prova cilíndricos. O Nível 2 destina-se a tráfego com ESAL entre 10^6 e 10^7 , sendo o projeto volumétrico utilizado como ponto de partida, mas também é necessária a realização de ensaios de previsão de desempenho. Por fim, o Nível 3 é referente ao tráfego com ESAL maior que 10^7 (LEANDRO,2016).

Por conseguinte, o método de dosagem superpave utiliza como modo de compactação o amassamento, através da aplicação de uma carga, acompanhado de um certo número de giros, ou seja, misturas projetadas devem apresentar um nível específico de energia de compactação. Segundo RELATÓRIO FINAL (2014), o compactador giratório aplica uma pressão constante de 600 kPa sobre a amostra dentro do molde durante o processo de compactação, onde o molde é fixado num ângulo de $1,25^\circ$ e sua base gira a 30 revoluções por minuto. Além disso, o superpave especifica que o teor de asfalto deve ser estipulado de modo a produzir 96% da G_{mm} a um determinado número de giros de projeto. O número de giros aplicado ao corpo de prova irá variar a depender dos ensaios mecânicos utilizados sendo os mais usuais 25,35 e 100 giros.

3.2.4 Ensaios Mecânicos

3.2.4.1 Resistência a tração por compressão diametral

O ensaio de compressão diametral permite simular um plano de ruptura idêntico ao plano de aplicação da carga, e tem por objetivo determinar a resistência à tração de corpos de prova cilíndricos de misturas betuminosas (MACEDO, 2015). Logo, a norma que regulamenta o ensaio é a DNIT-ME 138/94, sendo assim na realização do ensaio foram moldados corpos de prova cilíndricos pelo método marshall e superpave de dosagem, ao qual foram adicionados a misturas os teores de 0,3% de fibras de bagaço de cana.

O ensaio é feito colocando-se o corpo de prova em uma prensa ilustrada na Figura 12, ajustando-se os pratos desta prensa para dar uma ligeira compressão e para segurar o corpo de prova na posição. Aplica-se um deslocamento progressivamente a uma razão de $0,8 \pm 0,1$ mm/s até que se dê a ruptura do corpo de prova segundo um plano diametral vertical (MACEDO, 2015).

Figura 12: Prensa de ensaio de Resistência à Tração



3.2.4.2 Módulo de Resiliência

O ensaio baseia-se em aplicar uma força no mesmo sentido de compressão, sendo assim a carga empregada varia de zero até um determinado valor e depois é reduzida até atingir o zero, para atuar novamente após um pequeno intervalo de repouso esse fato tenta reproduzir as condições de campo. Com isso, a determinação do módulo de resiliência, ensaio de tração indireta com carregamento repetido, analisa o comportamento mecânico da mistura

asfáltica na zona onde ocorrem as deformações específicas de tração que acarretam na fadiga da camada.

O ensaio de Módulo de Resiliência (MR) foi realizado segundo a norma DNIT-ME 135/10, em que os resultados foram obtidos com auxílio do software UTS0031.39 *Indirect Tensile Modulus Test*, utilizando a prensa UTM-25 ilustrado na Figura 13, obtendo assim o módulo instantâneo. Com isso, foi realizado o condicionamento de 50 ciclos, e os LVDTs (*Linear Variable Differential Transducer*) medem a deformação elástica do CP ao estar submetido ao carregamento cíclico com frequência de 1Hz, sendo que 0,1 segundo é utilizado para aplicação de carga e 0,9 segundo para descanso. Além disso, o equipamento utilizado é automatizado, sendo o valor obtido através de uma média dos resultados em 5 leituras após os ciclos de condicionamento a que o CP é submetido.

Figura 13: Prensa UTM-25 utilizada para ensaio de Módulo de Resiliência



3.2.4.3 Estabilidade Marshall

O valor da estabilidade mede, de forma indireta, a resistência ao cisalhamento, o intertravamento e o atrito proporcionados pela fricção interna dos seus materiais e a coesão entre as partículas da mistura asfáltica (COSTA, 2017).

O ensaio foi regido seguindo as orientações da norma DNIT – ME 043/95, em que os corpos de prova cilíndricos devem ser colocados em banho-maria a 60 °C por um tempo entre o intervalo de 30 a 40 minutos. Realizado isso, os corpos de prova devem ser transferidos para o molde de ruptura sendo ensaiados pela aplicação de uma carga de compressão (kgf) crescente até atingir a ruptura.

3.2.4.4 Escorrimento de Misturas Asfálticas

O ensaio de escorrimento de misturas asfálticas tem como peculiaridade avaliar quantidade de material escorrido (gotejado) de uma amostra quente não compactada quando essa é submetida a altas temperaturas, sendo comparáveis aquelas utilizadas na produção, estocagem, transporte e espalhamento. Sendo assim, este experimento segue as recomendações estabelecidas na norma AASHTO T 305/97 em que preconiza entre outros fatores um escorrimento máximo de 0,3% do peso total ensaiado.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Caracterização Física dos Agregados

4.1.1 Ensaios de Granulometria

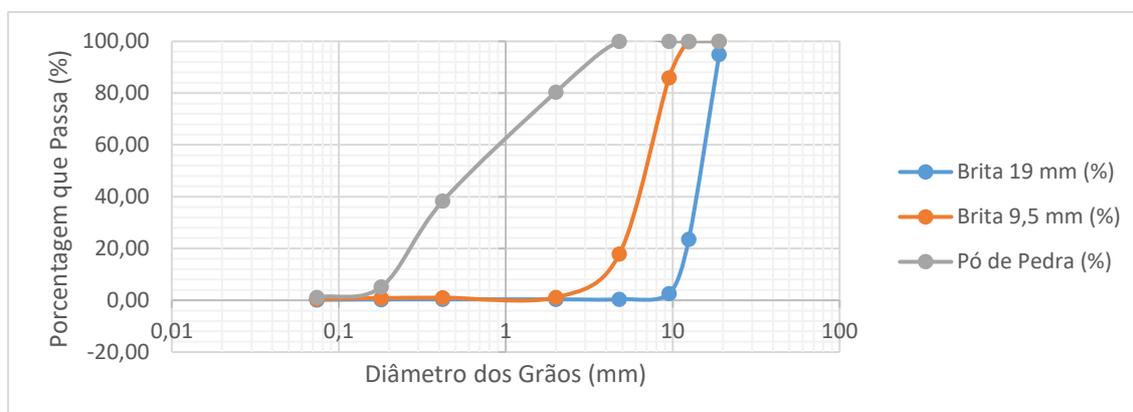
Foram realizadas a granulometria dos agregados utilizados nas misturas (Brita 19 mm e 9,5 mm, Pó de Pedra e Fíller). Sendo assim, a série de peneiras utilizadas nesse ensaio foram as com seguintes aberturas: 25 mm, 19,1 mm, 12,7 mm, 9,5 mm, 4,8 mm, 2 mm, 0,42 mm, 0,18 mm e 0,074 mm.

Tabela 05: Granulometria dos agregados

Quantidade Passante (%)					
Peneira (N)	Peneira (mm)	Brita 19	Brita 9,5	Pó de Pedra	Fíller
1"	25,4	100	100	100	100
3/4"	19,1	94,98	100	100	100
1/2"	12,7	23,57	99,92	100	100
3/8"	9,5	2,56	85,91	100	100
Nº 4	4,8	0,38	17,88	99,96	100
Nº 10	2	0,35	1,13	80,44	100
Nº 40	0,42	0,35	1	38,32	100
Nº 80	0,18	0,31	0,86	5,2	100
Nº 200	0,074	0,17	0,46	1,16	100

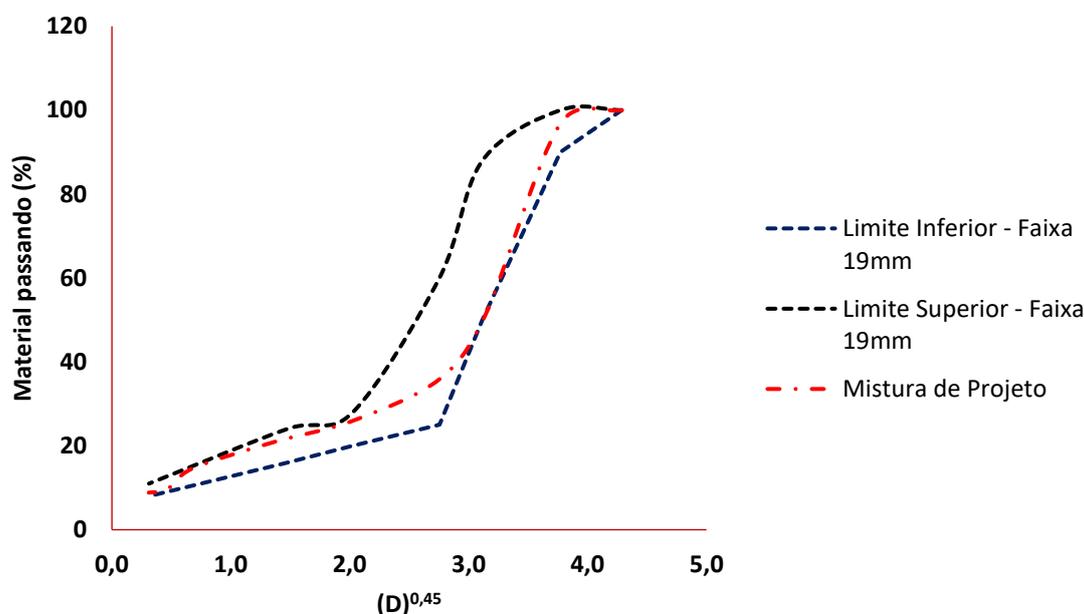
Diante dos resultados obtidos no ensaio de granulometria (Tabela 05), construiu-se a Curva Granulométrica dos agregados representada na Figura 14.

Figura 14: Curva granulométrica dos agregados



A partir da curva de Fuller e da granulometria dos agregados determinou-se uma dosagem que esteve enquadrada dentro dos parâmetros da norma AASHTO MP-08.

Figura 15: Mistura de projeto delimitada pelas faixas granulométricas da AASHTO – MP 08



A Figura 15 ilustra a curva de Fuller adotada para determinação da proporção de agregados utilizados para encontrar o teor ótimo de ligante da mistura, em que o eixo horizontal representa o diâmetro do agregado. É importante destacar que de acordo com os estudos realizados por COSTA (2017) o teor de ligante inicial (6%) era insuficiente para as composições granulométricas superior e intermediária, não sendo possível obter a homogeneização necessária do material. Diante disso, o ponto de partida da pesquisa foi adequar a curva granulométrica ao limite inferior, tendo de acordo com a Figura 15 um pouco de imprecisão, pois os resultados da análise granulométrica não favoreciam a aproximação ao máximo do limite inferior.

Tabela 06: Proporção dos agregados para determinação do teor ótimo

Quantidade (%)			
Brita 19 mm	Brita 9,5 mm	Pó de Pedra	Fíller
64	12,5	15	8,5

A partir da dosagem da Tabela 06 determinou-se as quantidades dos insumos utilizados para determinação do teor ótimo de ligante da mistura asfáltica, sendo assim ilustrada na Tabela 07.

Tabela 07: Quantidade dos materiais utilizados para determinar o teor ótimo de CAP 50/70

	Quantidade (%)				
	Brita 19 mm	Brita 9,5 mm	Pó de Pedra	Fíller	CAP
Mistura 01	60,48	11,81	14,18	8,03	5,5
Mistura 02	60,16	11,75	14,1	7,99	6
Mistura 03	59,84	11,69	14,03	7,95	6,5
Mistura 04	59,52	11,63	13,95	7,91	7

4.1.2 Massa Específica dos Agregados

O ensaio de massa específica real dos agregados (Brita 19 mm e 9,5 mm, Pó de Pedra e Fíller) foram regidos pela norma DNER – ME 081/98 e DNER – ME 084/95, obtendo os seguintes resultados ilustrados na Tabela 08.

Tabela 08: Massa Específica Real dos Agregados

	Brita 19 mm	Brita 9,5 mm	Pó de Pedra	Fíller
Massa Específica Real (g/cm³)	2,77	2,52	2,30	----

4.2 Caracterização do Ligante Asfáltico (CAP 50/70)

4.2.1 Ensaio de Penetração

O ensaio de penetração determina a consistência do ligante à temperatura de 25°C e o parâmetro penetração está diretamente relacionado à propriedade de rigidez do pavimento. Com isso, foi obtido no ensaio a média de 53 (mm/10) após a realização de cinco leituras de penetração estando assim dentro dos parâmetros da resolução nº 19 da Agência Nacional de Petróleo - ANP (2005) que estabelece uma faixa de classificação para os valores da penetração dos ligantes CAP 50/70, a qual de acordo a resolução deve estar entre 50 a 70 décimos de milímetro.

4.2.2 Ensaio de Ponto de Amolecimento

Esse ensaio visa verificar a sensibilidade do ligante a variação de temperatura, sendo fundamental para manutenção das propriedades do ligante a altas temperaturas e o aumento da resistência à deformação permanente. Por conseguinte, na realização do ensaio foi obtido uma média de 48°C que enquadra-se com o valor do limite mínimo estabelecido na resolução da ANP nº 19 /2005 que é uma temperatura de 46°C na condição normal.

É importante destacar a relação entre o ponto de amolecimento e penetração, sendo que o resultado de um é uma medida indireta do outro, ou seja, parâmetros inversamente proporcionais, pois o índice de rigidez correlaciona com a suscetibilidade do material a mudanças de temperatura. No campo, isto reflete na maior resistência do material tornar-se fluido, o que contribui para a resistência a deformações permanentes (MARINHO FILHO, 2017).

4.2.3 Viscosidade Rotacional

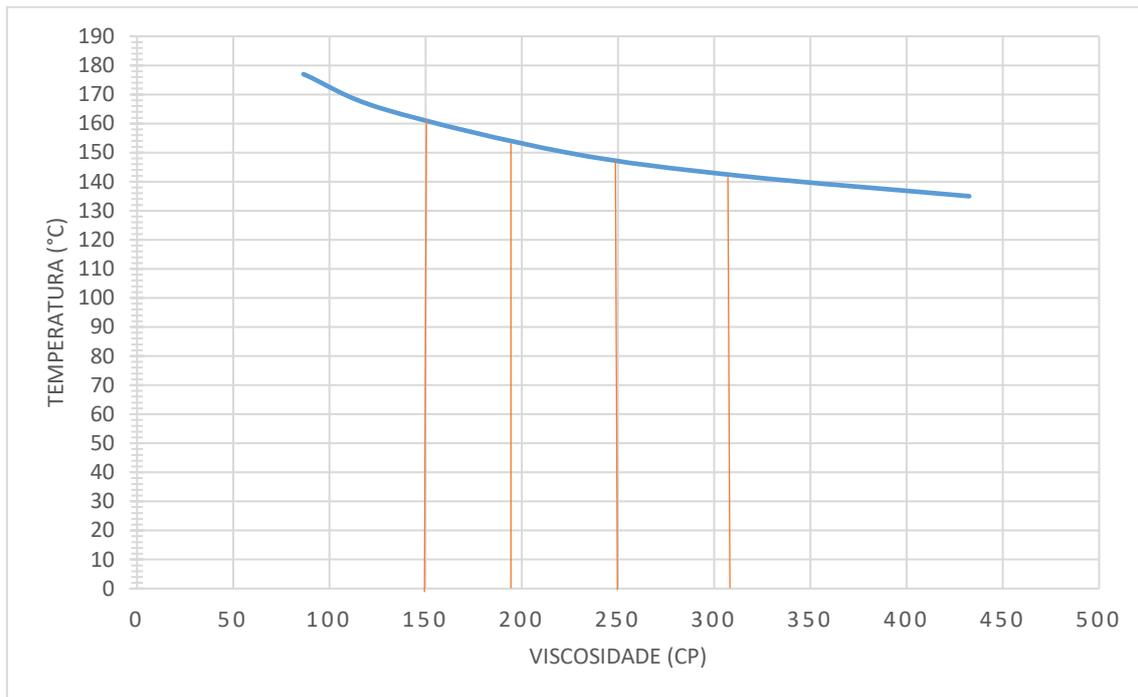
Diante do ensaio de viscosidade obteve-se os seguintes resultados ilustrados na Tabela 09.

Tabela 09: Viscosidade do CAP x Temperatura

Temperatura (°C)	135	142	150	165	177
Viscosidade (cP)	432,50	313,57	223,50	126,00	86,5

A partir da Tabela 08 foi possível traçar o gráfico Viscosidade x Temperatura, ilustrado na Figura 16 para determinar a temperatura da mistura (usinagem) e compactação do ligante associado aos agregados.

Figura 16: Curva de viscosidade rotacional (CAP 50/70)



Segundo estudos realizados por BERNUCCI *et al.* (2006), a temperatura do ligante ao ser misturado ao agregado deve ser tal que sua viscosidade esteja situada entre 150 e 190 cP (Faixa I). A temperatura dos agregados deve ser de 10°C a 15°C superior a temperatura do ligante. Além disso, as temperaturas do ligante e do agregado não devem ser inferiores a 107°C nem superiores a 177°C. Por conseguinte, a temperatura de compactação deve ser tal que o ligante apresente viscosidade entre 250 e 310 cP (Faixa II). É de suma importância destacar que os valores obtidos na Figura 16 enquadram-se na resolução da ANP nº 19/2005, que estipula valores mínimos de 274 cP a 135°C, 112 cP a 150°C e 28-114 cP a 177°C.

A temperatura da mistura (usinagem) expressa no intervalo da Faixa I obtida é de 157°C, sendo esse valor associado a viscosidade de 170 cP comumente utilizado na literatura interligado a um aumento de 10°C na temperatura obtida anteriormente para aquecimento dos agregados. Por outro lado, a temperatura de compactação é dada pela faixa II da Figura 15 em que obteve-se o valor de 145°C para realização da mistura dos agregados ao ligante.

Por fim, é de relevância citar um aspecto notado por GAMA (2016) em seus estudos, onde viscosidades muito baixas podem provocar escorregamento da mistura asfáltica quando compactada pela ação dos rolos compactadores.

4.3 Caracterização Mecânica

4.3.1 Dosagem Superpave

Nesta etapa são moldados os corpos de prova para posteriormente encontrar o teor ótimo de ligante a ser utilizado na mistura asfáltica SMA. Logo, a porcentagem ótima de ligante está associada a parâmetros de volumetria de cada CP em que calcula-se: o Volume de Vazios, Relação Betume/Vazios e Vazios do Agregado Mineral (VAM). Diante disso, moldou-se os corpos de prova com os teores de 5,5, 6, 6,5 e 7% de CAP para posterior análise das propriedades supracitadas, sendo assim todos os critérios adotados para obter o teor ótimo de ligante foi através da norma AASHTO MP 8-02/01. A Tabela 10 ilustra os resultados obtidos e que se enquadram dentro dos parâmetros pré-estabelecidos.

Tabela 10: Análise das propriedades obtidas do teor ótimo

Propriedades	Resultados	Requisitos para corpos de prova compactados no Superpave
Volume de Vazios (%)	4,0	4,0
VAM (Vazios no Agregado Mineral) (%)	17,14	17 mín.
Teor de Asfalto da Mistura (%)	6,2	6 mín.

4.3.1.1 Composição das misturas asfálticas avaliadas na pesquisa

Com a obtenção do teor ótimo de ligante (6,2%) foi possível averiguar as propriedades mecânicas das misturas com e sem fibras.

Tabela 11: Quantitativo dos materiais componentes das misturas asfálticas, com e sem adição de fibras

	Quantidade (%)				
	Brita 19 mm	Brita 9,5 mm	Pó de Pedra	Fíller	Fibra
CAP PURO	60,03	11,73	14,07	7,97	0
CAP + 0,3 % FIBRAS	59,84	11,69	14,03	7,95	0,3

4.3.2 Determinação das Características do Ensaio de Escorrimento

No ensaio de escorrimento foi analisado o comportamento da mistura com fibras (0,3%) não compactadas nas temperaturas de 150 °C e 165° C, sendo essas adotadas para verificar a quantidade de ligante escorrido das amostras ensaiadas, visando a compatibilidade existente com a produção, estocagem, transporte e espalhamento das misturas asfálticas.

O experimento foi realizado segundo as recomendações da norma AASHTO T 305/97, ao qual se resume em colocar a mistura (1200 g ± 5 g) em uma cesta de arame posicionada sobre um prato em estufa por 60 ± 5 minutos e em seguida obter a massa do ligante aderida ao prato. Logo, a Tabela 12 ilustra os resultados obtidos no ensaio.

Tabela 12: Ensaio de escorrimento de misturas asfálticas

AMOSTRA	Escorrimento (%)	
	150 °C	165 °C
CAP + 0,3% DE FIBRAS	0,18	0,12

Figura 17: Escorrimento do material em análise



4.3.3 Resistência a Tração

O ensaio de resistência a tração teve como objetivo avaliar a tensão máxima de ruptura dos corpos de prova com e sem fibras. Logo, é de fundamental importância destacar que o comprimento das fibras tem relevância considerável para um melhor resultado do ensaio no que se refere a tensão de ruptura, sendo assim o tamanho adotado para análise foi de 20 mm. A Tabela 13 ilustra os resultados obtidos na realização do ensaio.

Tabela 13: Resultados do Ensaio de Resistência a Tração

AMOSTRA	Resistência a Tração (MPa)		
	CP I	CP II	Média
CAP PURO	0,65	0,656	0,653
CAP + 0,3% DE FIBRAS	0,71	0,67	0,69

Diante dos resultados obtidos Tabela 13 pode se constatar que os valores obtidos estão enquadrados dentro da especificação do DER de São Paulo ET-DE-P00/031, adota 0,6 MPa como requisito mínimo. Com isso, ao realizar os ensaios dos referidos corpos de prova pode constatar que houve uma melhora de 5,6% na resistência a tração ao adicionar as fibras, conseqüentemente, foi verificado por análise visual que as deformações dos corpos de prova sem fibras superaram os com fibras.

4.3.4 Módulo de Resiliência

O ensaio de Módulo de Resiliência tem como objetivo averiguar a relação existente entre a tensão horizontal resultante da carga cíclica e a correspondente deformação horizontal obtida do deslocamento recuperável (resiliente) do corpo de prova em análise. Sendo assim, a carga utilizada na avaliação desse experimento deve estar entre 5% a 25% da resistência à tração segundo as especificações do DNIT 135/2018 - ME, sendo utilizada no ensaio 10% do valor do ensaio supracitado.

Tabela 14: Resultados do ensaio de Módulo de Resiliência (MR)

AMOSTRA	MR ASTM (MPa)		MR NBR (MPa)	
	CP I	CP II	CP I	CP II
CAP PURO	4399	4156	4932	4700
CAP + 0,3% DE FIBRAS	4871	4139	5502	5047

Tabela 15: Médias dos resultados do ensaio de Módulo de Resiliência (MR)

AMOSTRA	MR ASTM (MPa)	MR NBR (MPa)
CAP PURO	4277,5	4816
CAP + 0,3% DE FIBRAS	4505	5274,5

Diante dos resultados obtidos observa-se que com parâmetros da ASTM e NBR houveram através da adição dos 0,3% de fibras um aumento de 5,32% e 9,52% nas características de rigidez. Sendo assim, é importante destaca que a variação obtida para os dois parâmetros está relacionada ao coeficiente de Poisson (ν) considerado.

De acordo com os estudos realizados por LEAL (2013) na adição de fibras de bagaço de cana (tamanho < 1,2 mm) em misturas asfálticas obteve-se o módulo de resiliência de 2468 MPa e 2252 MPa para fibras de celulose. Com isso, ao analisar os resultados obtido está pesquisa em relação ao estudo supracitado verifica-se que houve uma melhoria significativa ao acrescentar 0,3% de fibras no tamanho de 20 mm.

4.3.5 Estabilidade Marshall

Os resultados obtidos para o ensaio de estabilidade marshall estão ilustrados na Tabela 16. Sendo assim, de acordo com as especificações norma AASHTO MP 8-02/01 o valor mínimo estabelecido é de 620 (kgf) para esse parâmetro em análise, o que realmente acontece experimento.

Tabela 16: Resultados da Estabilidade Marshall

AMOSTRA	Estabilidade Marshall (kgf)		
	CP I	CP II	Média
CAP PURO	630	615	622,5
CAP + 0,3% DE FIBRAS	720	690	705

Diante dos resultados ilustrados na tabela anterior pode se verificar que o acréscimo de 0,3% de fibras acarretou em um aumento de 6,92%.

De acordo com EL-HAGE (2012) em seus estudos a estabilidade Marshall é desconsiderada na maioria das normas de dosagem SMA, ao qual exige-se apenas controles volumétricos e mecânicos rigorosos para atingir o teor de projeto. Além disso, segundo estudos realizados por BROWN (1993) a estabilidade Marshall não apresenta uma boa previsão de desempenho para mistura SMA, advertindo que estabilidade muito baixa pode ser devido a problemas de dosagem tal qual observa-se em mistura de graduação densa.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

5.1 Considerações Finais

Diante dos resultados obtidos nos ensaios discutidos pôde se verificar que a mistura asfáltica SMA utilizando as fibras de bagaço de cana no teor de 0,3% apresentou bons resultados de avaliações de resistência e rigidez, o que realmente condiz com esse tipo de mistura. Por outro lado, deve-se destacar que o ensaio de escorrimento mostrou que a mistura se enquadra dentro dos parâmetros da norma analisada, sendo isso fundamental pra evitar o surgimento de patologias após a aplicação da mistura.

As fibras de bagaço de cana de acordo com este estudo mostraram-se uma alternativa bastante viável para as misturas do tipo SMA, pois seu comportamento ao realizar os ensaios mecânicos resultou em melhor desempenho. Sendo assim, a aplicação desse material na pavimentação além de melhorar algumas características essenciais contribui significativamente para a redução dos impactos ambientais gerados pelos resíduos oriundos das usinas de açúcar.

5.2 Sugestões para pesquisas futuras

Para melhor abordagem sobre o conteúdo tratado nessa pesquisa, sugere-se realizar os seguintes estudos adicionais:

- Estudar a interferência da adição de fibra de cana de açúcar em proporções diferentes da utilizada nesse estudo nas propriedades mecânicas de misturas asfálticas;
- Analisar o comportamento mecânico da mistura SMA com fibras de bagaço de cana através dos ensaios de fadiga, módulo dinâmico,

REFERÊNCIAS

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS - AASHTO MP 8-02: Stone Matrix Asphalt (SMA). Estados Unidos, 2001.

_____. AASHTO T 85: standard method of test for specific gravity and absorption of coarse aggregate. USA, 1991.

_____. AASHTO T 305: Determination of Draindown Characteristics in Uncompacted Asphalt Mixtures. Estados Unidos, 1997

_____. AASHTO T 104: standard method of test for soundness of aggregate by use of sodium sulfate or magnesium sulfate. USA, 1999.

_____. AASHTO T 96: standard method of test for resistance to degradation of small-size coarse aggregate by abrasion and impact in the Los Angeles Machine-HM-22: part IIA. USA, 2002.

_____. ASTM D4402: Standard Test Method for Viscosity Determination of Asphalt at Elevated Temperatures Using a Rotational Viscometer. West Conshohocken, PA, 2015.

_____. ASTM D5821: Standard Test Method for Determining the Percentage of Fractured Particles in Coarse Aggregate. Estados Unidos, 2013.

ANTUNES, D. S. C. Misturas betuminosas temperadas, do tipo SMA, com incorporação de material betuminoso reciclado e fibras celulósicas – Contribuição para a sua caracterização. 2014. 168f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil – Especialização em Construção Urbana). Instituto Superior de Engenharia de Coimbra, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15184: Materiais Betuminosos – Determinação da viscosidade em temperaturas elevadas usando viscosímetro rotacional. São Paulo, 2004.

BALBO, J. T. Pavimentação asfáltica: materiais, projeto e restauração. São Paulo: Oficina de Textos, 2007. 558p.

BATISTA, K. B. Desenvolvimento de ligantes asfálticos modificado com lignina como aditivo antienvhecimento. 2017. 110 f. Tese (Doutorado em Engenharia). Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Belo Horizonte, 2017.

BERNUCCI, L. B.; MOTTA, L. M. G.; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B. Pavimentação Asfáltica: Formação Básica para Engenheiros. Rio de Janeiro: PETROBRAS: ABEDA, 2008.

BELIGNI, M., VILLIBOR, D.F. e CINCERRE, J.R. (2000), 2000.

BLAZEJOWSKI, K. Stone Matrix Asphalt: Theory and Practice. 2ªed. Estados Unidos: CRC Press/ Taylor & Francis Group, 2010. 295p.

BLAZEJOWSKI, K. Stone Matrix Asphalt: Theory and Practice. Taylor & Francis Group. Boca Ratón-FL, 2011.

BRASIL. Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustível (ANP). Resolução nº 19 de 11 de julho de 2005. Estabelece as especificações dos cimentos asfálticos de petróleo comercializados pelos diversos agentes econômicos em todo o território nacional. Rio de Janeiro, 2005.

BROWN, E. R. Evaluation of laboratory properties of SMA mixtures. NCAT Report 9305. Alabama, 1993.

CASTRO, P. F.; LEAL, C. L.D. Estudo do bagaço de cana de açúcar como aditivo em SMA. In: XIII Safety, Health and Environment World Congress, Porto-Portugal, 2013.

CONAB. Companhia Nacional de Abastecimento. Observatório Agrícola: Acompanhamento da safra brasileira (cana-de-açúcar). 66 f. Safra 2018/2019, N.1 – Primeiro levantamento, v.5, Brasília-DF,2018.

COSTA, L. F. Análise do uso das fibras do pseudocaule da bananeira em misturas asfálticas SMA. 2017. 161f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental). Universidade Federal de Campina Grande,2017

CRAVO, M. C. C. Efeitos do envelhecimento térmico e fotoquímico em ligantes asfálticos, mástique e matriz de agregados finos. 2016. 280 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016.0

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM – DNER – ME 083/98. Agregados – análise granulométrica, Rio de Janeiro, 1998.

_____. DNER – ME 084/95. Agregado miúdo – determinação da densidade real, Rio de Janeiro, 1995.

_____. DNER – ME 081/98. Agregados – determinação da absorção e da densidade de agregado graúdo, Rio de Janeiro, 1998.

_____. DNIT – ME 138/94. Pavimentos flexíveis – Misturas betuminosas – Determinação da resistência à tração por compressão diametral – Método de ensaio, Rio de Janeiro, 1994.

_____. DNIT – ME 43/95. Misturas betuminosas a quente - ensaio Marshall, Rio de Janeiro, 1995.

_____. DNIT – ME 155/2010. Material asfáltico – determinação da penetração, Rio de Janeiro, 2010.

_____. DNIT – ME 131/2010. Materiais Asfálticos – Determinação do ponto de amolecimento – Método do Anel e Bola. Rio de Janeiro, 2010.

_____. DNIT – ME 135/2010. Pavimentação Asfáltica – Misturas Asfálticas – Determinação do módulo de resiliência – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2010.

_____. DNIT – ME 135/2018. Pavimentação Asfáltica – Misturas Asfálticas – Determinação do módulo de resiliência – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2018.

EAPA (European Asphalt Pavement Association). Heavy duty surfaces: the arguments for SMA. Bruxelas, Bélgica, 1998.

EL-HAGE, Robert Becerra. Estudo de misturas asfálticas tipo Stone Matrix Asphalt (SMA à luz dos compactadores Marshall e Superpave. 2012. 138f. Trabalho de conclusão de curso (Dissertação) – Mestrado em Ciências, Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012.

GAMA, D. A. Efeito da adição de polímeros reativo, não-reativo e ácido polifosfórico e suas combinações nas propriedades de ligantes asfálticos. 2016.

167 f. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais). Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2016.

KAWABATA, C. Y. Aproveitamento de Cinzas da Queima de Resíduos Agroindustriais na Produção de Compósitos Fibrosos e Concreto Leve para a Construção Rural. 165 p. Tese (Doutorado em Zootecnia). Universidade Estadual de São Paulo. Pirassununga, 2008.

LEAL, Cláudio Luiz Dias. Aproveitamento do bagaço de cana de açúcar em misturas asfálticas. 2013. 219f. Trabalho de Conclusão de Curso (Tese) – Tecnologia da Construção, Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2013.

LEANDRO, R. P. Avaliação do comportamento mecânico de corpos de prova de misturas asfálticas a quente resultantes de diferentes métodos de compactação / R. P. Leandro – versão corr. – São Paulo, 2016. 287p.

MACEDO, P. S. Avaliação das características físicas e mecânicas de misturas asfálticas modificadas com adição do CCBt. 2015. 90f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental). Universidade Federal de Campina Grande, 2015.

MACHADO, G. O. Preparação e Caracterização de CMC e CMC Graftizada. São Carlos, SP: 2000. 101p. Dissertação de Mestrado, Universidade São Paulo, Instituto de Química de São Carlos. MEDINA, J; & MOTTA, L. M. Mecânica dos Pavimentos. Rio de Janeiro, Editora UFRJ, 2005.

MANUAL DE ASFALTO. Instituto de Asfalto. Série do Manual N° 4 (MS-4), 1989.

MARINHO FILHO, P. G. T. Avaliação reológica de ligantes asfálticos modificados com nanopartículas de dióxido de titânio. 2017. 153 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental). Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, 2017

MORAES, T. M. R. P. Utilização da cera de carnaúba como aditivo redutor de temperaturas de usinagem e compactação de misturas asfálticas. 2018. 135f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental). Universidade Federal de Campina Grande, 2018.

MORILHA JUNIOR, A. Estudo sobre a ação de modificadores no envelhecimento dos ligantes asfálticos e nas propriedades mecânicas e de fadiga das misturas

asfálticas. 2004. 165 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004.

MOTTA, R. S. Estudo de misturas asfálticas mornas em revestimentos de pavimentos para redução de emissões de poluentes e de consumo energético, 2011. Tese de Doutorado – Universidade de São Paulo. São Paulo, SP, Brasil.

MOURÃO, Fabrício Augusto Lago. Misturas asfálticas de alto desempenho tipo SMA. 2003. 131f. Trabalho de Conclusão de Curso (Dissertação) – Ciências em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2003.

NAPA – NATIONAL ASPHALT PAVEMENT ASSOCIATION (2002). Designing and Constructing SMA Mixtures – State of Practice. Quality Improvement Series 122. Lanham, MD, EUA.

NATIONAL ASPHALT PAVEMENT ASSOCIATION. NAPA. Diseño y Fabricación – Mezclas SMA: Técnicas Prácticas. Traducida por la Asociación Mexicana del Asfalto. Autorizada por la NAPA: QIP-122S. México, 2007.

NASCIMENTO, T. C. B. Efeito dos envelhecimentos termo-oxidativo e foto-oxidativo sobre propriedades reológicas de ligantes asfálticos modificados. 2015. 274 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade de São Paulo, São Carlos, 2015.

NEVES FILHO, Cláudio Luiz Dubeux. Avaliação laboratorial de misturas asfálticas sma produzidas com ligante asfalto-borracha. 2004. 80 f. Trabalho de conclusão de curso. (Dissertação) – Mestrado em Engenharia Civil, Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2004.

SANTOS, N. S. Propriedades reológicas do ligante asfáltico (CAP/5070) modificado por adição de lignina. 2017. 101 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental). Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande. 2017.

SANTOS, N. S.; RODRIGUES, J. K. G.; MENDONÇA, A. M. G. D. Efeito da adição de lignina kraft proveniente da madeira de eucalipto na reologia do CAP 50/70. Matéria, v.23, n.3, Rio de Janeiro, RJ. 2018.

SOBREIRO, F. P. Efeito da adição de ácidos fosfóricos no comportamento reológico de ligantes asfálticos puros e modificados com copolímero SBS. 2014.

346 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Transportes). Universidade de São Paulo, São Carlos, 2014.

PIERCE, L. M. Stone Matrix Asphalt – SR-524, 64 th Avenue West to I-5. Report Washington State Transportation Commission. Washington, 2000.

RAMOS, Kleberson de Oliveira. Estudo sobre mistura asfáltica tipo Stone Matrix Asphalt (SMA) para pavimento aeroportuário. 2012. 196f. Trabalho de conclusão de curso (Dissertação) – Mestrado em Engenharia de Transportes, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2012.

RELATÓRIO FINAL, AUTOPISTA LITORAL SUL. Avaliação de Métodos de Dosagem de Misturas Asfálticas e sua Relação com as Propriedades Mecânicas, PROJETO 02 SGP / ALS_02 VER.00, 2014.

ROSA JÚNIOR, J. M. Estudo das propriedades reológicas do cimento asfáltico de petróleo (CAP 50/70) modificado com polímeros funcionalizados. 2015. 95 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental). Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2015.

SANTANA, T. M.R.; CORDEIRO, L.C.; SOUSA, K.S.; COUTINHO, J. V. M.; CAVALCANTE, E. H.; LOURENÇO, V. M. Q. Análise do uso da fibra do bagaço de cana-de-açúcar em mistura asfáltica do tipo SMA. In: 32º Congresso de Pesquisa e Ensino em Transporte da ANPET – ANPET, Gramado – RS, 2018.

SOREN, Rajendra. Laboratory investigation of Stone Matrix Asphalt using bagasse fiber. 2012. 71f. Trabalho de conclusão de curso (Monografia) – Bacharelado em Tecnologia da Engenharia Civil, National Institute of Technology, Rourkela, 2012.

SOUZA, Marcus Vinicius Ribeiro e. Efeito de fibras sintéticas nas propriedades de ligantes e concretos asfálticos. 2010. 150f. Trabalho de conclusão de curso (Dissertação) – Mestrado em Geotecnia, Universidade de Brasília, Brasília, 2010.

VALE, Aline Colares do. Estudo laboratorial da viabilidade do uso de fibras de coco em misturas asfálticas do tipo SMA. 2007. 147 f. Trabalho de conclusão de curso (Dissertação) – Curso de Mestrado em Ciências (M.Sc.) em Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2007.

