

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO DE JOINVILLE
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL DE INFRAESTRUTURA

BEATRIZ PAULA FIELDKIRCHER

AVALIAÇÃO COMPARATIVA DO DESEMPENHO DE MISTURAS ASFÁLTICAS DO
TIPO BBSG COM A INCORPORAÇÃO DE FIBRA DE SISAL

Joinville

2023

BEATRIZ PAULA FIELDKIRCHER

AVALIAÇÃO COMPARATIVA DO DESEMPENHO DE MISTURAS ASFÁLTICAS DO
TIPO BBSG COM A INCORPORAÇÃO DE FIBRA DE SISAL

Trabalho apresentado como requisito para obtenção do título de bacharel no Curso de Graduação em Engenharia Civil de Infraestrutura do Centro Tecnológico de Joinville da Universidade Federal de Santa Catarina.

Orientador: Dr. Breno Salgado Barra

Joinville

2023

BEATRIZ PAULA FIELDKIRCHER

AVALIAÇÃO COMPARATIVA DO DESEMPENHO DE MISTURAS ASFÁLTICAS DO
TIPO BBSG COM A INCORPORAÇÃO DE FIBRA DE SISAL

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do título de bacharel em Engenharia Civil de Infraestrutura, na Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico de Joinville.

Joinville (SC), 01 de junho de 2023.

Banca Examinadora:

Dr. Breno Salgado Barra

Orientador/Presidente

UFSC - Centro Tecnológico de Joinville

Prof. Dr. Eng. Yader Alfonso Guerrero Pérez

Membro

UFSC - Centro Tecnológico de Joinville

Prof. Dr. Fís. Alexandre Mikowski

Membro

UFSC - Centro Tecnológico de Joinville

RESUMO

O objetivo deste trabalho é avaliar as propriedades físicas e os parâmetros de dosagem de misturas asfálticas densas do tipo Béton Bitumineux Semi Grenus (BBSG) para utilização como camada de rolamento em estruturas de pavimento, a partir da incorporação de fibra vegetal de sisal. Para tanto, a curva granulométrica foi concebida utilizando as equações de Füller-Talbot, com granulares provenientes de rocha matriz de maciço gnáissico pertencente à jazida situada em Joinville/SC. O ligante betuminoso utilizado foi o Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP) 30/45, em sua forma pura. Para a campanha experimental, a metodologia Marshall foi utilizada e compreendeu oito teores de ligante, a saber: 4,22 %, 4,54 %, 4,70 %, 4,86 %, 5,18 %, 5,50 %, 5,82 % e 6,14 %, considerando dois teores distintos de fibra de sisal (0,3 % e 0,5 %) dispostas em fios com comprimento de 15,0 mm. A caracterização da referida fibra foi procedida a partir de análises por microscopia eletrônica de varredura (MEV), espectrometria por fluorescência de Raios-X (FRX), difratometria de Raios-X (DRX), termogravimetria (TGA) e calorimetria diferencial (DSC), e espectroscopia infravermelha por transformada de Fourier (FTIR). Complementarmente à metodologia Marshall, foram realizadas avaliações quanto à resistência à tração indireta e à ação deletéria da água no ensaio de Duriez a 18 °C. As análises se deram de forma comparativa a uma mistura asfáltica BBSG de referência, sem a incorporação de fibra de sisal. Os resultados obtidos indicaram que a adição da referida fibra às misturas asfálticas acarreta o aumento do teor de ligante betuminoso nas dosagens, devido à retenção nas tramas de concentração fibrilar e, conseqüente redução da resistência mecânica, em razão do aumento do volume de vazios internos, formando áreas sem contato efetivo das partículas granulares, fato que prejudica o intertravamento da matriz pétreia.

Palavras-chave: misturas asfálticas densas; BBSG; fibra de sisal; parâmetros de dosagem.

ABSTRACT

The main aim of this research is to evaluate the physical properties and the dosage parameters of dense asphalt mix so-called Béton Bitumineux Semi Grenus (BBSG) for being used as a surface layer in pavement structures, taking into account the addition of sisal fiber. The granulometric gradation was conceived based on Füller-Talbot's equations, with granular fractions provided by a gneissic quarry nearby Joinville/SC. The asphalt binder considered is classified by penetration as 30/45, in its pure form. For carrying out the experimental campaign they were selected eight distinct dosage contents of asphalt binder, such as 4,22 %, 4,54 %, 4,70 %, 4,86 %, 5,18 %, 5,50 %, 5,82 % e 6,14 %, comprising two formulations with 0,3 % and 0,5 % of sisal fiber incorporation, available in 15,0 mm length wires. The characterization of the aforementioned fiber was performed through scanning electron microscopy (SEM), X-ray fluorescence spectroscopy (XRF), X-ray diffraction (XRD), thermogravimetry (TGA), differential scanning calorimetry (DSC), and Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR) analyses. In addition to the Marshall methodology, they were evaluated for indirect tensile strength and resistance to water action in the Duriez test at 18 °C. The results obtained were compared to a reference BBSG asphalt mixture without the incorporation of sisal fiber. The results indicated that adding sisal fiber to the BBSG asphalt mixture not only increases the bituminous binder content but also reduces its mechanical strength. This is because the fiber increases the void content, interferes with the contact between granular particles, and absorbs part of the bituminous binder, leading to a loss in film thickness.

Keywords: dense asphalt mixes; BBSG; sisal fiber; dosage parameters.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1	- Fluxograma dos ensaios laboratoriais.	15
Figura 3.1	- Diagrama da Agave coletando água fluvial para própria irrigação.	22
Figura 3.2	- Estrutura de uma fibra vegetal.	26
Figura 4.1	- Representação da curva de projeto BBSG 0/14 mm.	34
Figura 4.2	- Amostras enviadas para caracterização laboratorial.	35
Figura 4.3	- Fibra de sisal.	36
Figura 4.4	- Partículas sólidas aderidas à parede dos fios da fibra de sisal (aumento de 429 vezes)	37
Figura 4.5	- Difratograma das amostras de fibra de sisal.	40
Figura 4.6	- TGA/DTGA da amostra de ligante betuminoso + 0,3 % de sisal.	42
Figura 4.7	- TGA/DTGA da amostra de ligante betuminoso + 0,5 % de sisal.	42
Figura 4.8	- Espectros por FTIR das amostras: (vermelha) ligante betuminoso puro, (azul) ligante betuminoso + 0,3 % de sisal, e (preta) ligante betuminoso + 0,5 % de sisal.	44
Figura 4.9	- Curva de viscosidade Saybolt-Furol para o CAP 30/45.	46
Figura 4.10	- Processo de corte e separação das amostras da fibra de sisal.	47
Figura 4.11	- Pesagem e separação das amostras de fibra de sisal.	48
Figura 4.12	- Procedimento do ensaio de MVR.	50
Figura 4.13	- Processo de produção das amostras.	53
Figura 4.14	- Processo de moldagem e compactação das amostras.	54
Figura 4.15	- Ensaio por compressão diametral.	56
Figura 4.16	- Ensaio de tração indireta.	57
Figura 4.17	- Sequência do ensaio de Duriez.	59
Figura 5.1	- Resultado do MVR para cada formulação.	60
Figura 5.2	- Resultados do ensaio Marshall.	62
Figura 5.3	- Resultados médios do ensaio de tração indireta.	66
Figura 5.4	- Relação da resistência condicionada (r) e não condicionada (R).	67

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1	- Propriedades mecânicas ao longo do comprimento da fibra de sisal da variedade Agave Sisalana.	27
Tabela 3.2	- Caracterização da Fibra de Sisal.	28
Tabela 4.1	- Resultado da caracterização dos materiais pétreos.	32
Tabela 4.2	- Composição Granulométrica da mistura BBSG 0/14 mm.	34
Tabela 4.3	- Composição química determinada por meio da técnica de energia dispersiva (EDS) durante o procedimento de microscopia eletrônica de varredura (MEV).	38
Tabela 4.4	- Distribuição percentual dos elementos químicos componentes da fibra de sisal por FRX.	38
Tabela 4.5	- Fases identificadas na análise difratométrica.	39
Tabela 4.6	- Laudo técnico do ligante asfáltico	45
Tabela 4.7	- Resultados da massa volumétrica real (MVR) das amostras.	51
Tabela 4.8	- Teores de CAP para a produção das amostras para os ensaios de MVR, Duriez e tração indireta.	52

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	-	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AFNOR	-	Association Française de Normalisation
ASTM	-	American Society for Testing and Materials
BBSG	-	Béton Bitumineux Semi Grenus
CAP	-	Cimento Asfáltico de Petróleo
CNT	-	Confederação Nacional do Transporte
CONAB	-	Companhia Nacional de Abastecimento
CTJ	-	Centro Tecnológico de Joinville
DNER	-	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DNER-ME	-	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem - Método de Ensaio
DNIT	-	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
DNIT-EM	-	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes - Especificação de Material
DNIT-ES	-	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes - Especificação de Serviço
DNIT-ME	-	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes – Método de Ensaio
DRX	-	Difração de Raio-X
DSC	-	Calorimetria Diferencial
EDS	-	Energia Dispersiva
EMBRAPA	-	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
FRX	-	Espectroscopia por Fluorescência de Raio-X
FTIR	-	Espectroscopia Infravermelha por Transformada de Fourier
IPEA	-	Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada
IPR	-	Instituto de Pesquisas Rodoviárias
LACAMI	-	Laboratório de Caracterização Microestrutural
LDTPav	-	Laboratório de Desenvolvimento e Tecnologia em Pavimentação
MEA	-	Massa Específica Aparente
MEV	-	Microscopia Eletrônica de Varredura
MEV	-	Microscopia Eletrônica de Varredura
MVR	-	Massa Volumétrica Real
PNL	-	Plano Nacional de Logística
PR	-	Paraná
RBV	-	Relação Betume e Vazios
RCD	-	Resíduo de Construção e Demolição
REPLAN	-	Refinaria Planalto de Paulina
RTI	-	Resistência à Tração Indireta
SATC	-	Centro Tecnológico em Criciúma
SC	-	Santa Catarina
SP	-	São Paulo
TGA	-	Termogravimetria
UFSC	-	Universidade Federal de Santa Catarina
V	-	Vazios
VAM	-	Vazios do Agregado Mineral
VCB	-	Vazios Cheios com Betume

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO	10
1.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS	10
1.2. OBJETIVOS	12
1.2.1. Objetivo Geral	12
1.2.2. Objetivos Específicos	12
1.3. PROCEDIMENTOS PARA ALCANÇAR O OBJETIVO	13
1.4. DELIMITAÇÃO DO ESPAÇO DA PESQUISA	15
1.5. RELEVÂNCIA DO TEMA	16
1.6. ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	17

CAPÍTULO 2

CONSIDERAÇÕES SOBRE MISTURAS ASFÁLTICAS DENSAS E BBSG	18
2.1. MISTURAS ASFÁLTICAS DE FORMULAÇÃO DENSA	18
2.2. MISTURAS ASFÁLTICAS DO TIPO BBSG	19
2.3. COMPORTAMENTO DE MISTURAS ASFÁLTICAS DENSAS	20

CAPÍTULO 3

FIBRA DE SISAL	22
3.1. PROCESSO DE PRODUÇÃO E MANUFATURA	24
3.2. PROPRIEDADES DAS FIBRAS DE SISAL	25
3.2.1. Incorporação de fibras em misturas asfálticas	28

CAPÍTULO 4

MATERIAIS E MÉTODOS	30
4.1. CARACTERIZAÇÃO DOS GRANULARES	30
4.1.1. Curva granulométrica	32
4.2. CARACTERIZAÇÃO DA FIBRA DE SISAL	34
4.2.1. Microscopia eletrônica de varredura (MEV)	36
4.2.2. Espectroscopia por fluorescência de Raio-X (RFX)	38
4.2.3. Difração de Raio-X (DRX)	39
4.2.4. Termogravimetria (TGA) e calorimetria diferencial (DSC)	41

4.2.5.	Espectroscopia infravermelha por transformada de Fourier (FTIR)	43
4.3.	CARACTERIZAÇÃO DO LIGANTE BETUMINOSO	45
4.4.	SEPARAÇÃO DAS AMOSTRAS DE FIBRA DE SISAL	46
4.5.	ENSAIOS LABORATORIAIS	48
4.5.1.	Massa específica volumétrica real (MVR)	49
4.5.2.	Preparação e mistura das amostras	51
4.5.3.	Metodologia Marshall	53
4.5.4.	Resistência à tração por compressão diametral	56
4.5.5.	Duriez a 18 °C	57

CAPÍTULO 5

RESULTADOS E DISCUSSÕES	60	
5.1.	MASSA ESPECÍFICA VOLUMÉTRICA REAL (MVR)	60
5.2.	ENSAIO MARSHALL	61
5.3.	RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL	65
5.4.	DURIEZ A 18 °C	67

CAPÍTULO 6

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	69
-----------------------------------	----

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS

A infraestrutura de transportes exerce papel primordial no desenvolvimento de um país, influenciando diretamente nos indicadores econômicos, além de proporcionar o deslocamento de cargas, bens, serviços e usuários (CLARA, 2020). No contexto brasileiro, o setor de transporte merece maior atenção devido a sua importância econômica e social no país. O setor exerce influência primacial na vida da população, a exemplo disto, na greve dos caminhoneiros de 2018, que tinha como motivação principal o preço do combustível, acabou por deixar o país com serviços paralisados, gerando escassez nos fornecimentos de insumos médicos, combustível, alimentos e itens de higiene, levando o país a um estado de calamidade em apenas 10 dias (SANTOS e SANTOS, 2021).

O modal rodoviário é o mais utilizado e com maior importância na matriz de transportes. Em razão das políticas públicas adotadas no país a partir da década dos anos 50 e aliadas ao elevado grau de liberdade das matrizes de origem e destino, as rodovias propiciam maior facilidade na aplicação prática do conceito porta a porta (PREGO, 2001). Devido a isso, dados do Plano Nacional de Logística 2035 (BRASIL, 2021), apontam, que o modal rodoviário comporta entre 64 % e 85 % das matrizes de transporte de cargas e cargas gerais, respectivamente, além de compreender 93 % da matriz de transporte de pessoas. Portanto, a necessidade do uso massivo desta modalidade enseja também a existência de rodovias e vias urbanas projetadas com estruturas de pavimento adequadas, que garantam a resistência aos esforços aplicados pelo tráfego e às ações intempéricas durante o período de projeto estimado.

Entretanto, são inúmeros os problemas relacionados à infraestrutura rodoviária no Brasil, sobretudo no que diz respeito à qualidade dos pavimentos. De acordo com o Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (2019), o total da malha viária brasileira é de 1,8 milhão de quilômetros de extensão. E de acordo com Pompermayer (2017), os gastos federais com a recuperação e manutenção das vias brasileiras superam R\$ 8 bilhões, e ainda assim, as vias apresentam deficiência.

Existem diversos fatores que influenciam na baixa qualidade dos pavimentos brasileiros e em sua rápida degradação, dentre os quais podem-se destacar a falta de fiscalização efetiva do excesso de peso por eixo nos veículos de carga, técnicas de execução em campo inadequadas, ausência de auscultação do pavimento de forma periódica e prévia à degradação

consumada, uso de métodos de ensaios sem estreita relação campo/laboratório, composições granulométricas baseadas em processos de tentativa e com frações comerciais heterogêneas, além de metodologias de formulação de misturas asfálticas e de dimensionamento de estruturas de pavimento tecnicamente obsoletas (XAVIER, 2022; TURCO, 2021; STASIAK, 2021; BARRA, 2009).

Com o intuito de melhorar as condições dos pavimentos, verifica-se uma crescente busca por novos materiais mais resistentes e sustentáveis que possam ser incorporados às misturas asfálticas. Um destaque a ser feito nesta linha de pesquisa são os estudos realizados para a inclusão de fibras de diversas origens nas formulações, a fim de promover a melhoria das propriedades físicas e mecânicas destes materiais, pois encontram-se direta e constantemente sujeitos às ações solicitantes das cargas do tráfego e ambientais (MASHAAN *et al.*, 2021; SOUSA *et al.*, 2017; CARVALHO, 2013; ABTAHI *et al.*, 2010, DUMKE, 2005).

Dentre as fibras utilizadas na engenharia, as de origem vegetal têm se constituído em uma alternativa às fibras sintéticas (vidro, carbono e poliéster, por exemplo) na produção de materiais compósitos, sobretudo em países de clima tropical, devido à abundância, menor custo, baixa densidade, biodegradabilidade, flexibilidade durante o processamento, menor desgaste, e pouco risco à saúde durante o manuseio (MARTIN *et al.*, 2009).

As fibras vegetais são caracterizadas por possuírem células alongadas, enfileiradas, e com paredes reforçadas por uma substância chamada lignina, responsável pela rigidez, impermeabilidade e resistência aos ataques microbiológicos e mecânicos aos tecidos vegetais (REIS 2012; EMBRAPA, 2010). Quando utilizadas em compósitos, tais características ajudam a formar uma interface entre a fibra e a matriz, atuando como uma ponte para transmissão dos esforços solicitantes (WU *et al.*, 2022).

Em relação às fibras de sisal, para se ter uma noção de valores, o preço mínimo da ajustado pelo Governo Federal em 2020 é de R\$ 2,60 por quilo, já o preço pago ao produtor em 2021 foi de R\$ 4,89 por quilo. Neste mesmo ano, a quantidade produzida no Brasil do insumo atingiu a escala de 82 mil toneladas (CONAB/SISALSUL, 2020).

Além do baixo custo, a utilização de fibras vegetais constitui um caráter de responsabilidade social e sustentável, devido contribuir no aproveitamento de resíduos orgânicos, evitando a exploração de recursos naturais intactos. Conhecida por ser a maior fonte de fibras duras do mundo e pela larga utilização na engenharia, a fibra de sisal, proveniente do sisal (*Agave Sisalana*), tem o Brasil como o maior produtor do mundo, com cerca de 140.000 ton./ano, em que o Estado da Bahia se destaca no cenário nacional com 95 % deste montante.

A destinação final da produção abrange principalmente a manufatura de barbante e corda (SILVA, BASTOS e SOARES, 2015).

Dhadiwal e Rajak (2022) complementam que, além das vantagens supracitadas, o uso do sisal como reforço de concreto se torna interessante devido a sua capacidade de elevar a resistência ao impacto, resistência à tração e flexão, além de ser uma fibra natural com alto módulo de elasticidade.

No intuito de adotar fibras vegetais para a promoção do conceito de sustentabilidade, utilizando matérias-primas provenientes de fontes renováveis, o presente trabalho objetiva avaliar os impactos nas propriedades físicas, nos parâmetros de dosagem e quanto à ação deletéria da água de misturas asfálticas densas do tipo *Béton Bitumineux Semi Grenus* (BBSG), a partir da incorporação de fibra de sisal nas formulações propostas.

1.2. OBJETIVOS

Para a execução deste trabalho foram estabelecidos os seguintes objetivos:

1.2.1. Objetivo Geral

Avaliar o impacto da incorporação de fibra de sisal nas propriedades físicas, nos parâmetros de dosagem e quanto à ação deletéria da água, em formulações de misturas asfálticas densas do tipo *Béton Bitumineux Semi Grenus* (BBSG).

1.2.2. Objetivos Específicos

- Definir a curva granulométrica das formulações de misturas asfálticas a ser utilizada, a partir do uso do método teórico de Füller-Talbot;
- Caracterizar as amostras de fibra de sisal com base nos ensaios de microscopia eletrônica de varredura (MEV), difração de Raio-X (DRX), espectroscopia por fluorescência de Raio-X (FRX), Espectroscopia infravermelha por transformada de Fourier (FTIR) e Termogravimetria (TGA) e calorimetria diferencial (DSC);
- Formular misturas asfálticas compreendendo dois teores de fibra de sisal (0,3 % e 0,5 %), e produzir corpos de prova a partir da metodologia Marshall;
- Realizar ensaios laboratoriais complementares às análises dos parâmetros da metodologia Marshall, considerando a resistência ao esforço de tração indireta e o efeito da ação deletéria da água nas formulações, a partir do ensaio de Duriez a 18 °C;

- Comparar os resultados obtidos com uma mistura de referência formulada nas mesmas características da BBSG proposta neste trabalho, porém, compostas apenas por materiais britados, previamente estudada por Fronza (2022);
- Determinar com base nos resultados obtidos na campanha experimental, as dosagens de trabalho de ligante betuminoso em cada caso, bem como verificar a viabilidade técnica do uso da fibra de sisal em misturas asfálticas densas do tipo BBSG.

1.3. PROCEDIMENTOS PARA ALCANÇAR O OBJETIVO

Para o desenvolvimento da pesquisa foram utilizados materiais granulares obtidos na jazida da empresa Rudnick Minérios Ltda., localizada em Joinville/SC, empresa parceira do Laboratório de Desenvolvimento e Tecnologia em Pavimentação (LDTPav) situado no Centro Tecnológico de Joinville (CTJ) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). O ligante betuminoso escolhido é classificado por penetração em 30/45 (0,1 mm), fornecido pela refinaria REPLAN/Petrobrás, localizada em Paulínia/SP.

Os dados de caracterização dos materiais granulares e do ligante betuminoso, bem como a definição da curva granulométrica pelo método teórico de Füller-Talbot para misturas asfálticas do tipo *Béton Bitumineux Semi Grenus* (BBSG), foram considerados dos trabalhos desenvolvidos por Evaldt (2023) e Fronza (2022), em razão da utilização dos mesmos lotes de insumos e arranjo das frações britadas à época da produção da mistura asfáltica de referência. Desta forma, torna-se viável a comparação direta dos resultados obtidos àquele momento com os desta pesquisa.

A fibra de sisal foi fornecida pela empresa Sisal Sul, localizada em São Paulo/SP, compreendendo fardos com fios alongados, os quais serão reduzidos por cortes ao comprimento de fios com 15,0 mm, subdivididos em dois teores proporcionais ao volume de ligante betuminoso, a saber 0,3 % e 0,5 %. Estes valores foram selecionados com base nas recomendações de pesquisas já realizadas em âmbito nacional (SOUSA *et al.*, 2017; BARRETO JÚNIOR *et al.*, 2006), que estudaram o comportamento físico e mecânico de misturas asfálticas do tipo *Stone Mastic Asphalt* (SMA) com a incorporação da fibra de sisal, utilizando corpos de prova Marshall na campanha experimental realizada.

A caracterização das propriedades físicas da fibra de sisal ocorreu nas instalações do Laboratório de Caracterização Microestrutural (LACAMI) do Centro Tecnológico SATC, localizado em Criciúma/SC. Os estudos compreenderam microscopia eletrônica de varredura (MEV), espectrometria por fluorescência de Raios-X (FRX), difratometria de Raios-X (DRX),

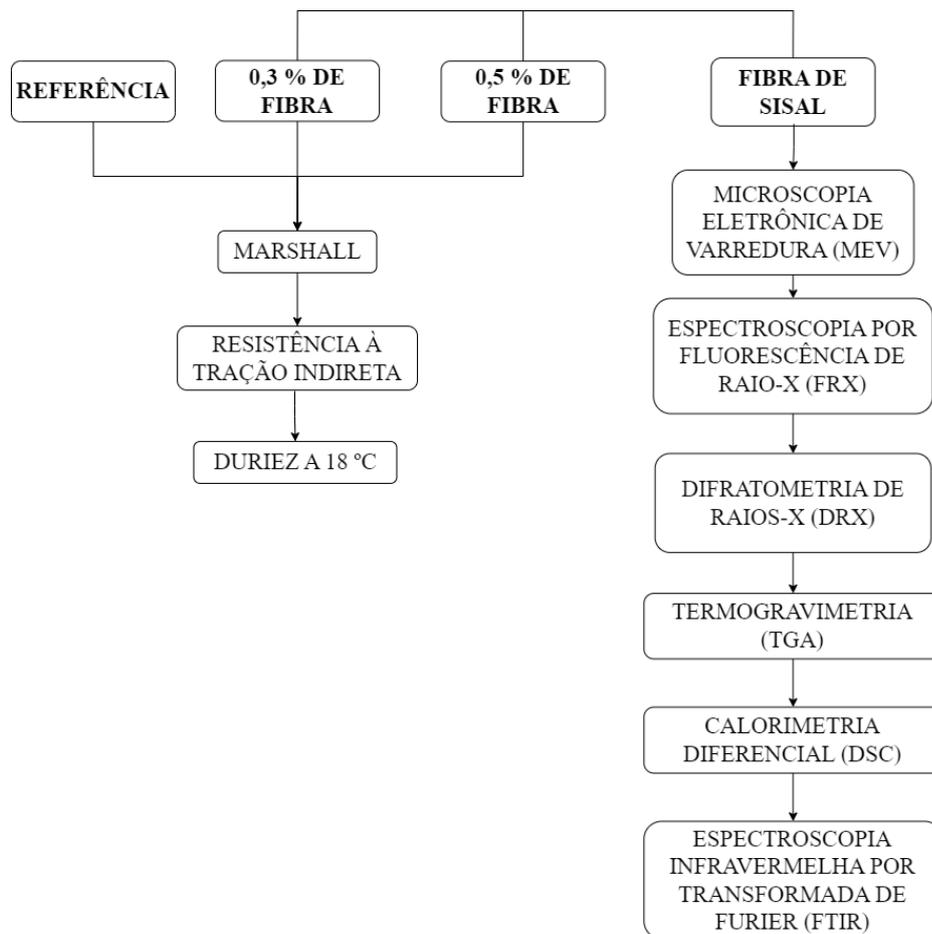
termogravimetria (TGA) e calorimetria diferencial (DSC), e espectroscopia infravermelha por transformada de Fourier (FTIR).

A dosagem das misturas asfálticas foi a partir do ensaio Marshall, com o objetivo de determinar o teor de ligante de trabalho de cada formulação, devido ser a metodologia oficial adotada no Brasil pelo Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) para esta finalidade. Para tanto, foram testados oito teores de ligante: 4,22 %, 4,54 %, 4,70 %, 4,86 %, 5,18 %, 5,50 %, 5,82 % e 6,14 %, sendo que para cada um, cinco corpos de prova foram produzidos, compreendendo 40 unidades para cada uma das duas formulações propostas (0,3 e 0,5 % de sisal) e 40 para a formulação de referência, totalizando 120 corpos de prova.

De maneira complementar, a fim de definir a melhor dosagem, dentre as três mais bem apontadas pelos parâmetros da metodologia Marshall, em cada caso, as amostras foram testadas no ensaio de Resistência à Tração Indireta (RTI). Para tal, 5 corpos de prova de cada dosagem selecionada no ensaio foram produzidos, ou seja, 15 unidades para cada uma das duas formulações com a incorporação de sisal, e 15 unidades para as amostras de referência, perfazendo um total de 45 corpos de prova.

Em paralelo, foram confeccionados 54 corpos de prova para realizar o ensaio de Duriez a 18 °C, com a finalidade de analisar comparativamente o desempenho de cada teor, considerando a resistência à ação deletéria da água em cada uma das formulações produzidas, bem como as formulações de referência. A Figura 1.1 ilustra o fluxograma dos ensaios realizados na presente pesquisa.

Figura 1.1 - Fluxograma dos ensaios laboratoriais.



Fonte: Autora.

1.4. DELIMITAÇÃO DO ESPAÇO DA PESQUISA

A pesquisa foi executada em sua totalidade no âmbito laboratorial, sem a pretensão de realizar estudos e análises de campo ou computacional. A campanha experimental foi realizada integralmente no Laboratório de Desenvolvimento e Tecnologia em Pavimentação (LDTPav) do Centro Tecnológico de Joinville (CTJ) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), que dispõe de todos os equipamentos e recursos necessários para realização dos objetivos da pesquisa, exceto as análises de caracterização da fibra de sisal, que ocorreram nas instalações do Centro Tecnológico SATC, de Criciúma/SC, conforme já explanado no tópico 1.2.

1.5. RELEVÂNCIA DO TEMA

A produção de materiais é uma importante fonte de emissão de gases do efeito estufa. A fim de mudar o cenário crítico de degradação do meio ambiente, políticas vêm sendo adotadas para garantir maior eficiência dos materiais, e adotar uma economia circular como estratégia de redução dos gases de efeito estufa. Entre 1995 e 2015, esses gases sofreram um aumento de 120 % na produção de materiais em todo o mundo, com 11 bilhões de toneladas de dióxido de carbono (CO₂) emitidos em 2015 (HERTWICH, 2021).

Os gases de efeito estufa são moléculas encontradas na atmosfera com a capacidade de reter o calor do sol, causando o aquecimento do planeta (EPA, 2022; NATIONAL GEOGRAPHIC EDUCATION, 2022). Sendo o dióxido de carbono (CO₂), o vapor de água (H₂O) e o metano (CH₄), importantes gases de efeito estufa (ACS, 2014), muitos países estão trabalhando em conjunto para limitar as emissões futuras desses gases (NATIONAL RESEARCH COUNCIL, 2010). De forma geral, o efeito estufa é um processo que ocorre quando esses gases aprisionam o calor do sol, tornando a terra mais quente do que seria sem eles (EPA, 2022; NATIONAL GEOGRAPHIC EDUCATION, 2022).

Desta forma, a utilização de fibras naturais na indústria atende ao conceito de sustentabilidade por seu impacto ambiental positivo em relação as fibras sintéticas, uma vez que fibras naturais são provenientes de fontes renováveis, com baixo custo energético de produção e são consideradas carbono neutro, ou seja, quando compostadas ou queimadas, retornam a mesma quantidade de CO₂ para atmosfera. Concomitantemente, as fibras naturais apresentam vantagens sociais e salubres, considerando que o processo de trabalho durante sua extração não causa irritação dérmica e respiratória em trabalhadores, além de ser uma fonte geradora de empregos para diversos produtores familiares (JOHN e THOMAS, 2008).

Uma das características mais importante da fibra é a propriedade relacionada ao seu comprimento. De forma geral, a fibra, especialmente a fibra contínua, é vantajosa devido a proporção entre comprimento/diâmetro ser infinitamente grande, tornando-a bastante flexível, permitindo que a fibra seja convertida em fio e utilizada em formas mais complexas. Quando utilizadas em misturas asfálticas, a absorção do ligante asfáltico pelas fibras de superfície porosa, leva a um aumento da viscosidade da mistura e, como resultado, confere maior flexibilidade devido a formação de mais filmes asfálticos que preenchem microfissuras. Além disso, as fibras preenchidas com ligante betuminoso, devido a sua capacidade de absorção de ligante e entrelaçamento com o material pétreo, realocam tensões no aparecimento de fissuras, proporcionando maior resistência á flexão (MASHAAN *et al.*, 2021).

Fissura é um dos principais defeitos em pavimentos asfálticos, as trincas rapidamente se propagam sem um efetivo tratamento de prevenção, causando impactos econômicos e sociais adversos (BAI e WANG, 2023). Logo, estudar e determinar as propriedades, bem como testar o desempenho de diferentes materiais para composição de misturas asfálticas em consonância à interação com o meio ambiente, enseja o objetivo desta pesquisa de viabilizar simultaneamente a concepção de formulações que garantam a durabilidade em serviço do produto, aliando a mitigação de impacto na natureza em caráter sustentável e baixo custo com a produção de insumos.

1.6. ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

A organização deste trabalho está estruturada conforme descrito abaixo:

Capítulo 1: Introduz o tema ao leitor, inteirando-o dos objetivos propostos e motivações que conduziram à realização da pesquisa.

Capítulo 2: Trata sobre as características das misturas asfálticas com formulação densas, abordando em destaque o tipo *Béton Bitumineux Semi Grenus* (BBSG).

Capítulo 3: Aborda aspectos históricos, indicadores econômicos, processo de obtenção e manufatura, além das propriedades da fibra de sisal.

Capítulo 4: Descreve os materiais e métodos utilizados para a execução da pesquisa.

Capítulo 5: Apresentação e discussão técnica dos resultados obtidos.

Capítulo 6: Discorre sobre as conclusões obtidas na campanha experimental, bem como propõe recomendações para trabalhos futuros.

CAPÍTULO 2

CONSIDERAÇÕES SOBRE MISTURAS ASFÁLTICAS DENSAS E BBSG

A seleção dos granulares é uma das mais importantes características das misturas asfálticas, conforme aponta Andrade (2018), dado que sua composição é basicamente de granulares e ligante betuminoso. Neste contexto, Bernucci *et al.* (2022) apresenta uma classificação de misturas asfálticas baseada na composição granulométrica, dividindo em formulações densas, abertas e descontínuas. Para compreensão do objetivo geral deste estudo, o presente capítulo apresenta e caracteriza conceitualmente misturas asfálticas densas e do tipo *Béton Bitumineux Semi Grenus* (BBSG).

2.1. MISTURAS ASFÁLTICAS DE FORMULAÇÃO DENSA

A distribuição do tamanho dos granulares afeta diretamente o comportamento das misturas asfálticas em termos de intertravamento dos granulares, dureza, estabilidade, durabilidade, permeabilidade, trabalhabilidade, resistência à fadiga, à abrasão e a danos climáticos (CRUZ *et al.*, 2022, ZAMAN e TAREFDER, 2002). Para Silva *et al.* (2015), as misturas asfálticas devem combinar as propriedades físicas e químicas do material granular com um método apropriado de seleção de tamanho de partícula. Dessa forma, a mistura deve garantir o intertravamento das partículas e absorver um teor de ligante suficiente para manter a estrutura coesa, estável e resistir à deformação permanente.

A mistura asfáltica densa tem uma distribuição contínua dos granulares, de modo que os vazios são preenchidos por grãos menores. Em vista disso, a principal diferença da graduação densa para a graduação aberta é a uniformidade da curva granulométrica. Em razão da graduação aberta apresentar grãos de mesmo tamanho, o volume de vazios é maior, isso ocorre devido a insuficiência de preenchimento com granulares finos. Por outro lado, na graduação descontínua, verifica-se um maior contato entre os granulares graúdos, os vazios são preenchidos por granulares finos e há pouca quantidade de grãos de dimensões intermediárias (BERNUCCI *et al.*, 2022).

No Brasil, as misturas densas representam as soluções mais adotadas. Uma vez que o arranjo das partículas se apresenta de forma bem graduada, a porcentagem de vazios atinge a recomendação da norma DNIT 031/2006 – ES, ou seja, entre 3% e 5% para camada de

rolamento e 4 % a 6 % para camadas de ligação. De modo geral, as misturas densas são caracterizadas por sua classificação granulométrica com proporções bem distribuídas entre peneiras de diferentes tamanhos, e são facilmente densificadas (LEITE *et al.*, 2021).

Misturas densas podem ser relativamente impermeáveis e são adequadas para aplicação em qualquer camada do pavimento sob diferentes condições de tráfego, desde que adequadamente projetadas e construídas. Uma mistura de graduação densa atende diversas necessidades de projeto, como por exemplo, a utilização em camadas estruturais, nivelamento e restauração de pavimentos. Além disso, ainda promove adequado atrito na camada de rolamento (GUYER, 2021; NAPA, 2001).

Em relação ao comportamento mecânico, em misturas densas, a resistência é desenvolvida principalmente através do intertravamento dos granulares e da viscosidade do ligante betuminoso. A introdução de granulares graúdos contribui com a capacidade de suporte de misturas do tipo densas. Além disso, são caracterizadas por conter um baixo volume de vazios, tipicamente entre 3 % e 10 % e diâmetros máximos de 50 mm na composição dos granulares. A norma norte americana ASTM D 3515 fornece a especificação técnica para este tipo de faixa granulométrica (SPEIGHT, 2016; ACOTT, 1988, apud BUTTON *et al.*, 1990).

2.2. MISTURAS ASFÁLTICAS DO TIPO BBSG

Na França, denominado como *Béton Bitumineux Semi Grenus* (BBSG), é definido pela norma AFNOR NF P98-130 (1993) como concreto betuminoso semi-graduado denso. É produzido a quente, e destinado a camadas de rolamento e ligação em pavimentos. Com espessura média entre 5 cm e 9 cm, a norma francesa define as características, testes, condições de fabricação controle tecnológico e aplicação.

Utilizadas em camadas de revestimento, reforço ou manutenção do pavimento, as misturas BBSG são preparadas usualmente por uma composição de ligante, granulares e eventualmente aditivos. Dois tipos de misturas BBSG são classificadas pela norma de acordo com o diâmetro máximo dos granulares: concreto betuminoso semi-graduado 0/10 mm (BBSG 0/10) e concreto betuminoso semi-graduado 0/14 mm (BBSG 0/14). Sendo assim, a formulação da curva granulométrica segue a norma XP P 18-540, e utiliza peneiras com aberturas correspondente aos seguintes diâmetros: 2 mm, 4 mm, 6,3 mm, 10 mm, e 14 mm (AFNOR NF P 98-130, 1993).

A norma francesa enquadra misturas BBSG em três classes de desempenho: classe 1, 2 ou 3. Essas classes dependem do nível de utilização e são definidas por meio de teste de

formulação. O objetivo dos testes de formulação é estabelecer, para uma determinada composição, as características da mistura asfáltica: percentagem de vazios, resistência à ação deletéria da água, e testes de desempenhos mecânico (deformação permanente, fadiga e módulo complexo) (AFNOR NF P 98-130, 1993). Adicionalmente, caracterizada pelo alto teor de granulares, esse tipo de mistura pode ser designado por sua resistência à deformação permanente como BBSG1, BBSG2 e BBSG3 (MANUEL LPC, 2007).

2.3. COMPORTAMENTO DE MISTURAS ASFÁLTICAS DENSAS

O comportamento do concreto asfáltico é diretamente influenciado pelas características da mistura, que são projetadas para diferentes níveis de tráfego e diferentes volumes de vazios (SPEIGHT, 2016). Da mesma forma, são afetadas por fatores ambientais, que modificam o comportamento com a ação do tráfego. Sob o ponto de vista do comportamento mecânico, as degradações na forma de propagação das fissuras de fadiga e deformação permanente são governadas pelas tensões e deformações reversíveis dentro da estrutura sob a solicitação do tráfego (MOMM, 1998).

A deformação permanente no revestimento asfáltico, denominada também como afundamento de trilha de roda, é uma depressão localizada nas trilhas de roda, onde ocorre elevações em suas bordas. É um dos principais defeitos estruturais que diminuem a vida de serviço de revestimentos asfálticos (KIM E NEWCOMB, 1993; DOMINGUES, 1993). Já a deformação irreversivelmente acumulada, ocorre, quando o revestimento é submetido a uma carga de curto prazo a cada passagem de veículo. Esta solicitação causa micro deformações na camada diminuindo a rigidez do material, e pode, por acúmulo de tensões, levar o material à falha por fadiga (RAHMAN *et al.*, 2022; BENEDETTO *et al.*, 2004).

As irregularidades superficiais influenciam diretamente no comportamento de um pavimento no que diz respeito a conforto, ruído, segurança e aderência pneu-pavimento. Tais irregularidades na superfície do pavimento tem o potencial de ocasionar desde desgastes do sistema de suspensão de veículos, até danos em cargas (VITÓRIA, 2016; SPECHT *et al.*, 2007).

Estas deformações podem ser decorrentes por exemplo, devido à baixa capacidade de suporte do solo de fundação, falhas na compactação, método construtivo inadequado da estrutura do pavimento, subdimensionamento da estrutura (ligado a ruptura por cisalhamento), problemas envolvendo drenagem e diminuição da resistência ao cisalhamento da estrutura, deformação plástica do revestimento por projeto inadequado da mistura, e desgaste por uso em

regiões de clima frio, onde há a utilização de correntes em rodovias cobertas por gelo (BARRA, 2005; CARVALHO, 2000).

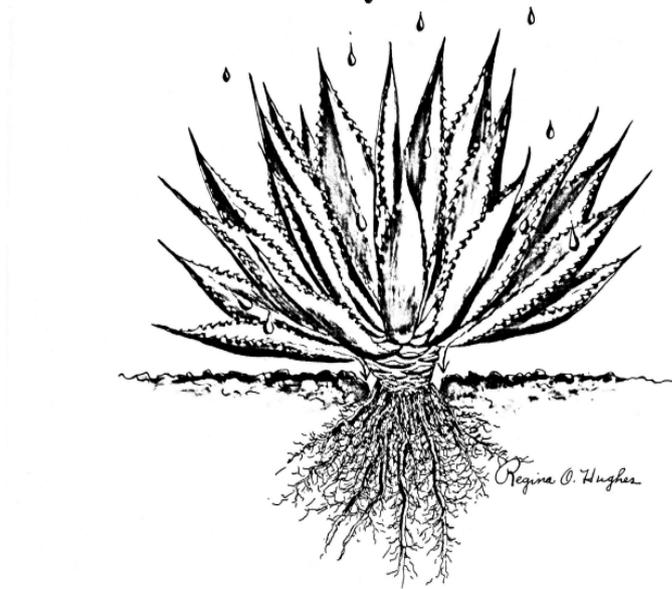
De acordo com Speight (2016), granulares pétreos de superfície angular e textura rugosa são desejáveis em misturas asfálticas, dessa forma, garante-se uma maior resistência à deformação permanente e às trincas por fadiga, aumentando a durabilidade da estrutura. A camada de revestimento dotada de granulares com estas características, proporcionam melhor intertravamento entre as partículas, o que ajuda a prevenir a deformação plástica dentro da camada do revestimento. Adicionalmente, a angularidade e rugosidade dos granulares pétreos também ajudam a melhorar a resistência das misturas asfálticas, o que previne rachaduras por fadiga e melhoram as propriedades de atrito das camadas do pavimento, uma importante consideração de segurança no projeto de misturas asfálticas para camadas de pavimento.

CAPÍTULO 3

FIBRA DE SISAL

A fibra de sisal, originada pela planta *Agave Sisalana* (Figura 3.1), é descrita por Gentry (1982), como uma planta facilmente reconhecida por suas folhas maduras e verdes, na qual formam-se rosetas entre 1,5 a 2 m de altura, e cobrem a área de ocupação da planta captando água. As folhas são ensiformes (forma de espada), carnudas, fibrosas e lisas. O caule, é curto, com aproximadamente 2,5 cm de comprimento, tem forma cônica e com ponta em forma de sovela, marrom escuro e sulcado superficialmente.

Figura 3.1 - Diagrama da Agave coletando água fluvial para própria irrigação.



Fonte: Gentry (1982).

Fibras naturais podem ser divididas de acordo com a sua origem em animais, vegetais ou minerais. As fibras provenientes de plantas são compostas por celulose, enquanto as de origem animal (pelo, seda ou lã) são compostas por proteína (JOHN; THOMAS, 2008). As fibras naturais são vitais para a economia de muitos países em desenvolvimento. De acordo com a Discover Natural Fibres Initiative (DNFI, 2017), estima-se que 60 milhões de famílias estão envolvidas na produção de fibras naturais, alcançando mais de 200 milhões de pessoas por ano no mundo. Dado a importância do setor, o ano de 2009 foi proclamado como *Ano Internacional das Fibras Naturais* pela Assembleia Geral das Nações Unidas (PIRES, 2009).

A principal fonte de fibras duras vegetais do mundo são as longas, rígidas, carnosas e fibrosas folhas das espécies do gênero *Agave* (LOCK, 1969; WIENK, 1976 apud OSNORBE; SINGH, 1980). Porém, duas espécies, *Agave Sisalana* (*sisal*) e *Agave Fourcroydes Lemaire* (*henequém*) são fontes de 70 % da produção mundial (EMBRAPA, 2014) de fibras duras vegetais. O cultivo das plantas ocorre especialmente em países de clima tropical, sendo os principais países produtores da fibra o Brasil e a Tanzânia (SINDIFIBRAS, 2020; OSNORBE; SINGH, 1980).

O cultivo da planta agave iniciou nas Ilhas Mesoamericanas, e se espalhou para o México, Ilhas Canárias, Ásia, África e Costas do Mediterrâneo. Deste modo, a indústria de fibras da *Agave* foi desenvolvida no século XIX e XX com a *Agave Sisalana* (GENTRY, 1982). Inicialmente, nativos do México utilizavam a planta como fonte de alimento, fabricação de bebidas alcoólicas e na produção utensílios. Do México, a *Agave* foi levada para outros países que se dedicaram na exploração e comercialização da fibra, especialmente a espécie *Agave Sisalana* e *Agave Fourcroydes Lemaire*. A primeira, conhecida como sisal, é a principal espécie cultivada no Brasil, e a mais produzida no mundo. A segunda, conhecida como *henequém*, tem seu principal produtor o México e suas fibras são normalmente mais fracas do que as do sisal (OASHI, 1999; SOUSA, 1987).

A importância do cultivo da planta de sisal no Brasil está representada tanto em aspectos econômicos como em aspectos sociais, especialmente na região do nordeste brasileiro, onde a planta encontra características edafoclimáticas propícias para crescimento. Com uma produção nacional média anual de 80 mil toneladas em aproximadamente 200 hectares, o estado da Bahia concentra 93 % da produção nacional, já os estados de Paraíba e Rio Grande do Norte completam a produção com 4 % e 3 % respectivamente. Porém, deste total produzido no Brasil, 85 % se destinam a exportação, principalmente para os Estados Unidos e China (BRASIL, 2019).

A Bahia exporta a fibra de sisal na forma de produtos como fios agrícolas, cordas, fios de embalagem, tapetes, mantas para colchões, e fibrocimento (SINDIFIBRAS, 2020). Embora o mercado tradicional de fibras naturais tenha perdido espaço para as fibras sintéticas (FAO, 2012), estas fibras possuem características técnicas e econômicas adequadas para uso em aplicações inovadoras de maior valor. O potencial econômico de utilização de fibras naturais está crescendo, inúmeras aplicações têm sido estudadas, e dentre elas cabe citar a aplicação em compósitos, materiais de construção, móveis, componente para indústria automotiva, adição em misturas asfálticas, biomassa, e resíduos para geração de biogás (MASHAAN *et al.*, 2021; FAO, 2012; JOHN e THOMAS, 2008; OASHI, 1999; OSNORBE e SINGH, 1980).

3.1. PROCESSO DE PRODUÇÃO E MANUFATURA

As folhas do sisal produzem uma fibra altamente resistente, porém, o potencial produtivo está diretamente ligado à capacidade genética da planta, condições climáticas, sanidade e tratos culturais. O pleno desenvolvimento da planta requer altitude de 200 a 800 metros acima do nível do mar, temperatura entre 20 °C e 28 °C, precipitação pluvial distribuída entre 600 e 1.500 mm/ano, solos silicosos, sílico-argilosos, permeáveis, de média fertilidade, ricos em calcário, potássio e fósforo. A planta não suporta longas estiagens e a precipitação pluvial interfere na qualidade da fibra, bem como o pH do solo que deve variar entre 5,0 a 8,0 (PROSSIGA, 2004 apud ALVES *et al.*, 2005; SILVA, 1999; SOUSA, 1987).

Apesar da qualidade da fibra estar relacionada com as condições de cultivo, a planta se adapta a diferentes solos e climas, e pode ser conservada por longos períodos em campo. Por este motivo, usualmente as plantações são localizadas em zonas particularmente semiáridas, onde outras plantas não conseguem sobreviver devido a severas condições climáticas (FAO, 2012; SOUSA, 1987). Além disso, o clima semiárido e quente é propício para o desenvolvimento da planta, uma vez que o sisal apresenta capacidade de reter água da chuva e do orvalho (SOARES *et al.*, 2022).

O cultivo do sisal é considerado relativamente simples, mas requer alguns cuidados básicos para garantir a sua produção. A primeira etapa do processo produtivo é a limpeza da vegetação do solo, esta operação é seguida pelo amontoamento do material vegetal residual que poderá ser utilizado como barreira para erosão. Em seguida, inicia-se o plantio, podendo ser em viveiros (bulbilhos) ou rebentões (filhotes) (EMBRAPA, 2014). Os bulbilhos são pequenas plantas que se desenvolvem no escapo floral, após a queda das flores; já os rebentos, nascem da planta-mãe, em caules subterrâneos na base da planta. Normalmente, os rebentos têm sido mais utilizados no plantio do sisal no Nordeste brasileiro (SFI, 2023; VUORINNE *et al.*, 2021).

O primeiro corte da planta *Agave Sisalana* é realizado após 3 anos do plantio, são colhidas, em média, de 50 a 60 folhas, das quais de 30 % a 40 % são impróprias para a cordoaria. As colheitas subsequentes produzem cerca de 30 folhas, este ciclo dura de 8 a 10 anos com aproximadamente um corte por ano. A principal operação pós-colheita é o desfibramento, processo complexo e de custo elevado no qual se elimina a polpa das fibras, mediante uma raspagem mecânica. Atualmente são utilizados rotores raspadores nesta prática, conhecidos também como *motor de agave* ou *máquina paraibana*. Em condições normais, pode-se desfibrilar entre 550 a 820 kg de folhas por hora. Os processos subsequentes envolvem a lavagem, secagem e limpeza da fibra (SILVA, 2008).

3.2. PROPRIEDADES DAS FIBRAS DE SISAL

As fibras de origem natural podem ser consideradas compósitos naturais, visto que são constituídas principalmente por fibrilas de celulose envolvidas em uma matriz de lignina e hemicelulose (Figura 3.2). Em virtude de as microfibrilas de celulose estarem estruturadas ao longo do comprimento da fibra, elas propiciam ao mesmo tempo rigidez e resistência à tração e à flexão. Contudo, a eficiência do reforço utilizando fibras naturais depende da natureza da celulose e de sua cristalinidade (JOHN e THOMAS, 2008).

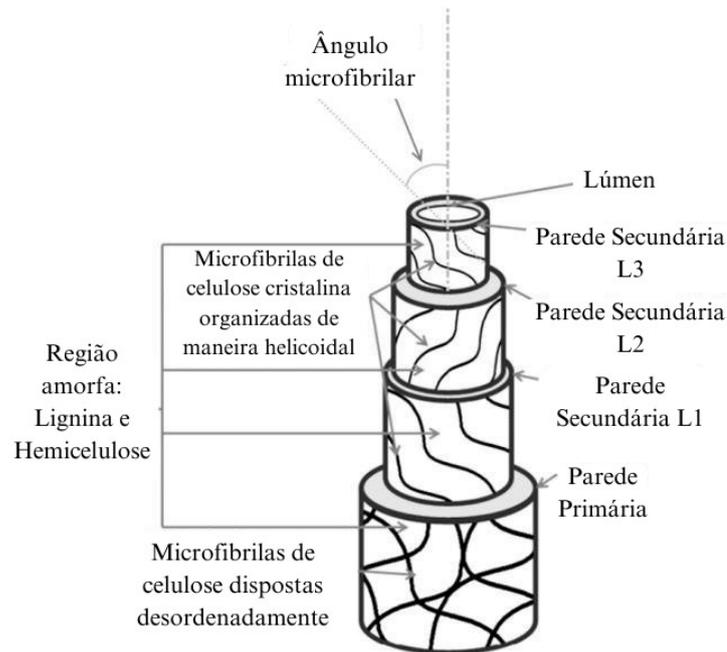
A celulose é a estrutura base das células de plantas, e a substância natural mais importante produzida por organismos vivos. A porcentagem de celulose em plantas varia dependendo da origem do material, sendo alta em fibras vegetais e têxteis, por exemplo, e baixa em musgos e bactérias. Acrescenta-se ainda, que a celulose é um polímero natural, formado por unidades de glicose, resistente à bases fortes e agentes oxidantes, entretanto, é facilmente hidrolisada por ácidos e açúcares solúveis em água. O grau de cristalinidade varia de 70 a 80 % para fibras têxteis como o Cotton, e vegetais como o sisal (FENGEL e WEGENER, 1989).

Assim como a celulose, a hemicelulose pode ser facilmente hidrolisada em ácidos, porém, ela possui um grau de polimerização menor, é solúvel em base e é responsável por formar uma matriz de suporte para as microfibrilas de celulose. Já a lignina, um polímero de hidrocarbonetos complexos constituído por componentes aromáticos e alifáticos, é totalmente insolúvel na maioria dos solventes, amorfa e hidrofóbica por natureza. No entanto, por se ligar à celulose e à hemicelulose, a lignina propicia rigidez às plantas (JOHN e THOMAS, 2008).

A parede celular de fibras vegetais é formada por uma estrutura (Figura 3.2) dividida em camadas estruturadas em arranjos de forma concêntrica, com variação na orientação dos elementos e composição química. Estas camadas são chamadas de parede primária e parede secundária, que, por sua vez, é subdividida em três camadas, L1, L2 e L3 compostas por microfibrilas dispostas de forma helicoidal (FENGEL e WEGENER, 1989). Segundo John e Thomas (2008), a espessa camada intermediária (L2) determina as propriedades mecânicas da fibra, e o ângulo formado entre elas e o eixo da fibra é chamado de ângulo microfibrilar.

As propriedades mecânicas da fibra estão ligadas às suas propriedades físicas, químicas e morfológicas. A resistência à tração, por exemplo, é provida pelo teor de celulose, e o ângulo microfibrilar é proporcional à deformação que a fibra sofre até atingir a falha. Já o módulo de elasticidade, é proporcional ao teor de celulose, e inversamente proporcional ao ângulo microfibrilar. Dessa forma, quanto maior o ângulo microfibrilar e menor o teor de celulose, mais dúctil é o comportamento da fibra. (DEFOIRDT *et al.*, 2010).

Figura 3.2 - Estrutura de uma fibra vegetal.



Fonte: Adaptado de John e Thomas (2008).

O índice de cristalinidade que exerce um papel de influência na maioria das propriedades dos polímeros, está diretamente relacionado com a quantidade de celulose presente nas fibras, pois a celulose é o único componente que se cristaliza (MARTIN *et al.*, 2009 apud Rowell *et al.*, 1997). Além disso, é uma fração volumétrica, que por sua vez, quanto maior o seu valor, mais alinhadas estarão as cadeias e, portanto, mais elevadas são as propriedades de densidade, rigidez, estabilidade dimensional, resistência química, resistência a abrasão, e temperatura de fusão (CANEVAROLO, 2006). Diante do exposto, fibras lignocelulósicas oferecem vantagens mecânicas que possibilitam sua aplicação como reforço estrutural, como por exemplo, resistência à tração na direção longitudinal da fibra. Em suma, as propriedades mecânicas dependem do teor de celulose, ângulo microfibrilar na parede celular secundária, e índice de cristalinidade da estrutura.

De modo geral, as fibras se dividem em microfibras e macrofibras. As microfibras apresentam um diâmetro em média de 10 a 30 μm , e as macrofibras são classificadas pelo seu diâmetro superior a 0,3 mm. A principal diferença entre a utilização de micro ou macrofibra é em relação a sua resistência estrutural, visto que as microfibras são utilizadas para controlar a retração e fissuração no domínio da plasticidade, e as macrofibras são indicadas como reforço na resistência residual pós-fissuração do compósito. Macrofibras, portanto, tem a capacidade

de aumentar a capacidade de compósitos em absorver energia após o rompimento da matriz (SALVADOR, 2013).

Em estudo realizado por Martin et al (2009) em fibras de sisal brasileira, 50 amostras representativas de fibras em 4 diferentes posições ao longo do comprimento da fibra foram ensaiadas. O resultado apresentado para a caracterização química e estrutural da fibra de sisal apontou que as propriedades mecânicas ao longo do comprimento indicam resultados satisfatórios para serem utilizadas como reforço de compósitos e aplicações na indústria. Porém, cabe salientar que devido ao fato de o teor de celulose aumentar ao longo do comprimento da folha, os melhores resultados são obtidos na parte intermediária da folha (30-60 cm), e o pior desempenho na parte próxima à raiz (90-120 cm). Os resultados obtidos por Martin *et al.* (2009) são apresentados na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Propriedades mecânicas ao longo do comprimento da fibra de sisal da variedade Agave Sisalana.

Posição na fibra	Resistência à tração (MPa)	Módulo elástico (GPa)	Alongamento (%)	Diâmetro (μm)
0-30 cm	448 \pm 113	10 \pm 3	5 \pm 1	465 \pm 20
30-60 cm	671 \pm 274	25 \pm 4	3 \pm 1	430 \pm 9
60-90 cm	565 \pm 146	22 \pm 4	3 \pm 1	440 \pm 20
90-120 cm	369 \pm 129	17 \pm 3	2 \pm 1	143 \pm 14

Fonte: Adaptado de Martin *et al.* (2009).

Visto que a composição química e física de fibras naturais (tipo e teor de celulose, ângulo microfibrilar, grau de polimerização) determinam suas propriedades físicas (BLEDZKI e GASSAN, 1998), Sydenstricker *et al.* (2002) conduziu um estudo de caracterização da fibra de sisal brasileira. Neste estudo, a superfície das fibras foi modificada por tratamento com NaOH (hidróxido de sódio) ou solução de N-isopropylacrylamide. A caracterização foi então realizada para a fibra antes e após o tratamento superficial. Os resultados para a composição química e propriedades da fibra sem tratamento estão apresentados na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 - Caracterização da Fibra de Sisal.

Parâmetro	Valor
α -Celulose	73 %
Hemicelulose	10,1 %
Lignina	7,6 %
Extratos	6,2 %
Ca, K, Mg, sulfatos, fosfatos, silicatos, carbonatos etc.	3,1 %
Densidade	1,26 g/cm ³
Resistência à tração	324,2 \pm 173,9 MPa
Grau de cristalinidade	72,2 %

Fonte: Sydenstricker *et al.* (2002).

3.2.1. Incorporação de fibras em misturas asfálticas

O uso de fibras vegetais em misturas asfálticas tem o potencial melhorar o desempenho mecânico da mistura. Apesar da escassez de estudos conclusivos, são encontrados na literatura estudos realizados com a incorporação da fibra de sisal. Dentre eles é possível citar em compósitos, onde dentre os resultados, obteve-se o aumento do módulo dinâmico, o aumento da resistência à tração (MASHAAN *et al.*, 2021; SOUSA *et al.*, 2017; ABTAHI *et al.*, 2009), e melhora na resistência à propagação de trincas (REIS, 2012). Além disso, segundo Martin *et al.* (2009), devido a sua composição, a fibra de sisal suporta altas temperaturas sem afetar suas propriedades, em seu estudo, resultados demonstraram que as fibras de sisal suportam uma temperatura de até 250 °C sem iniciar degradação e perda de massa.

Fundamentalmente, fibras vegetais são quimicamente inertes (NOGUEROL *et al.*, 2021), sendo assim, não interagem quimicamente com o ligante. Esta propriedade é desejável visto que sua função como aplicação é de apenas melhorar as propriedades mecânicas da mistura sem interferir nas propriedades químicas do ligante betuminoso. De acordo com Bernucci *et al.* (2022), as fibras aumentam o teor de ligante na mistura, e, conseqüentemente a película asfáltica. Esse aumento do filme de ligante retarda a desagregação dos granulares e aumenta a resistência ao desgaste sem prejudicar a permeabilidade.

Por conta de suas propriedades físicas e inerente compatibilidade com o ligante betuminoso, a adição de fibras ao concreto asfáltico tem a capacidade de aprimorar a resistência a fadiga e aumentar a ductilidade da mistura. As fibras são utilizadas preferencialmente para prevenir e retardar a propagação de trincas, ao invés de um reforço estrutural da camada de revestimento que suportaria o carregamento (NITISH e THAKUR, 2018).

As fibras em seu estado natural não se dispersam facilmente, são fortemente unidas e se emaranham com facilidade durante o processo de preparação, afetando diretamente a dispersão na mistura e causando efeitos negativos (LI *et al.* 2023; CARVALHO, 2012). A adição de fibras à mistura asfáltica pode ser feita por meio de dois processos principais: o processo seco e o processo molhado. No processo seco acrescenta-se as fibras aos granulares antes da adição de ligante betuminoso na mistura. Já no processo molhado, adiciona-se as fibras diretamente ao ligante betuminoso antes dos granulares. De forma geral, o processo seco é mais recomendado do que o processo molhado devido a facilidade de execução e a menor tendência de formação de grumos e pelotas com as fibras na mistura (MASHAAN *et al.*, 2021).

Experimentos anteriores mostraram que a adição de pequenas quantidades da fibra na mistura é suficiente para melhorar as propriedades mecânicas citadas anteriormente. O teor ótimo de fibra é utilizado na literatura entre 0,3 % e 0,5 %, e o tamanho usualmente de 10 mm a 15 mm (LI *et al.* 2023; SINGH *et al.*, 2022; RAZAHI e CHOPRA, 2020; KAR *et al.*, 2019).

CAPÍTULO 4

MATERIAIS E MÉTODOS

O projeto de misturas asfálticas demanda atenção aos detalhes que envolvem os testes e procedimentos. Sendo assim, deve-se seguir corretamente instruções normativas e utilizar adequadamente as técnicas de laboratório, relacionando os testes de formulação da mistura asfáltica com as especificações e requerimentos técnicos (ASPHALT INSTITUTE, 1988). O objetivo do presente capítulo, portanto, é apresentar os materiais aplicados na pesquisa, provendo os parâmetros de caracterização dos granulares pétreos, ligante betuminoso, e da fibra de sisal. Acrescenta-se ainda, a descrição da metodologia de concepção da mistura e ensaios de âmbito laboratorial.

4.1. CARACTERIZAÇÃO DOS GRANULARES

Os materiais pétreos utilizados nesta pesquisa têm como procedência o processo de britagem do maciço rochoso gnáissico realizado pela empresa Rudnick Minérios LTDA, localizada em Joinville/SC. A utilização destes materiais se deu em função da parceria entre a referida empresa e o laboratório LDTPav. Como a mistura asfáltica apresenta uma porcentagem maior de seu volume composta por granulares, o desempenho da mistura pode ter uma relação direta com suas propriedades físicas e químicas (ANDRADE, 2018).

Os efeitos da angularidade e textura superficial dos agregados têm influência na trabalhabilidade, adesividade, estabilidade da mistura e deformação permanente observada em campo (PAN *et al.*, 2006). Estudos mostraram os efeitos de propriedades morfológicas dos agregados no comportamento mecânico do concreto asfáltico (MOTTA *et al.*, 2015), bem como a influência da adesividade ligante-agregado nas propriedades das misturas asfálticas (FROSSARD, 2021). Sendo assim, a seleção dos materiais pétreos ocorre a partir de ensaios de caracterização dos parâmetros e comparação com especificações técnicas normatizadas.

Para Momm (1998), na seleção dos granulares deve-se levar em conta o tamanho, dureza, forma, graduação, aspereza da superfície, sanidade, compatibilidade com o cimento asfáltico e a absorção das partículas. O autor ainda define os parâmetros de seleção da seguinte forma:

O tamanho das partículas influencia diretamente na macrotextura superficial. O parâmetro é determinado por uma série de peneiras com diferentes tamanhos de abertura, geralmente em ordem decrescente como no caso da série ASTM;

- A durabilidade do pavimento sofre influência do efeito da dureza dos materiais pétreos, ou seja, a sanidade dos agregados sujeitos à ação do tempo. Os ensaios para a determinação deste parâmetro são o Abrasão Los Angeles, durabilidade (DNER-ME 089, 1994)
- O índice de forma, relacionado com a aderência é um parâmetro dos granulares influenciado pelas características da rocha-mãe, porém, alterado pelas técnicas de britagem;
- A compatibilidade entre o material betuminoso e pétreo depende do granular deixar-se aderir pelo asfalto, e pode ser verificado pelo teste de adesividade.

Além dos parâmetros citados por Momm, (1998) outras características são importantes no processo de seleção, visto que os materiais pétreos precisam atender a especificações técnicas. Em vista disso, os parâmetros foram obtidos em testes como o equivalente de areia, teor de material pulverulento, absorção de água pelas partículas, massa específica aparente e massa específica real.

O teste equivalente de areia é estabelecido pela norma DNER-ME 54 (1997), e determina a relação volumétrica de materiais como argila ou pó em amostras de solo ou agregado miúdo. O teor de material pulverulento segue a norma DNER-ME 266 (1997), e é utilizado na determinação de minerais com partículas de dimensão menor do que 0,075 mm e materiais solúveis em água. A norma DNER-ME 81 (1998), trata da absorção de água em agregados graúdos, assim como a norma DNER-ME 84 (1998) para agregados miúdos, a absorção é dada pelo aumento de massa do agregado como efeito da absorção de água em seus vazios permeáveis. A massa específica aparente obtida através das normas DNER-ME 195 (1997), DNER -ME 081 (1998), e DNER-ME 084 (1995), pode ser definida como a relação entre a massa do agregado seco e o volume ocupado por suas partículas e vazios. Por fim, a massa específica real é a relação entre a massa da amostra e o volume ocupado por suas partículas sólidas.

Com base em dados de caracterização dos granulares realizado por Fronza (2022), que utilizou agregados oriundos da mesma origem, a Tabela 4.1 apresenta os resultados da caracterização dos materiais pétreos utilizados no presente estudo.

Tabela 4.1 - Resultado da caracterização dos materiais pétreos.

Ensaio	Resultados	Limites	Norma
Abrasão Los Angeles	13,4 %	≤ 50 %	DNER-ME 35/98
Durabilidade	3,1 %	≤ 12 %	DNER-ME 89/94
Índice de Forma	0,65	≥ 0,5 %	NBR 7809/2006
Adesividade	Má	-	DNER-ME 78/94
Equivalente de Areia	78 %	-	DNER-ME 54/97
Teor de material pulverulento	0,1 %	≤ 1,0 %	DNER-ME 266/97
Absorção	0,3 %	-	DNER-ME 81/98 e DNER-ME 84/95
Massa específica aparente	2,768 g/cm ³	-	DNER-ME 195/97
Massa específica real	2,812 g/cm ³	-	DNER-ME 195/97

Fonte: Fronza (2022).

De acordo com Pereira (2009) e Pan *et al.* (2006), a quantidade de energia necessária para quebrar a união entre o ligante betuminoso e a partícula granular está relacionada à adesividade do conjunto. Como descrito na Tabela 1, a má adesividade observada pode ser atribuída à composição química do granular. Bernucci *et al.* (2022) indicam que granulares de origem gnáissica possuem elevada percentagem de sílica (SiO₂), o que resulta em uma carga fortemente eletronegativa na presença de água. Como consequência, esses materiais apresentam comportamento hidrófilo e baixa adsorção química de líquidos quando em contato com a superfície do granular. Para a solução do problema são utilizados fileres ativos ou aditivos melhoradores de adesividade.

Como nesta pesquisa buscou-se focar apenas no efeito da incorporação da fibra de sisal na formulação de misturas asfálticas densas, não foram adotadas medidas de correção da adesividade dos granulares, a fim de que não se tornasse uma variável de interferência no comportamento original das fibras.

4.1.1. Curva granulométrica

A aderência pneu-pavimento tem um impacto significativo na segurança de um pavimento. A fim de garantir as adequadas características de aderência, a macrotextura do revestimento deve balancear o tipo de material pétreo uma adequada distribuição granulométrica (ADALGARI *et al.*, 2020; MOMM, 1998). A curva granulométrica deve ser escolhida a partir de aspectos como a origem rochosa, adequado processo de britagem das rochas e peneiramento do material pétreo, funcionalidade da mistura asfáltica em campo, estudo de tráfego do local de implantação e especificações normativas (BARRA *et al.*, 2010).

Füller-Talbot, propuseram uma equação de distribuição granulométrica contínua dada pela Equação 4.1, que permite o cálculo do percentual de material retido em uma determinada sequência de peneiras.

$$P = 100 \times \left(\frac{d}{D}\right)^n \quad (4.1)$$

Onde:

P = Porcentagem volumétrica de partículas menores que o diâmetro d;

d = diâmetro da partícula;

D = diâmetro da maior partícula do conjunto;

n = coeficiente de distribuição.

O coeficiente n pode ser calculado para se obter diferentes densidades através da equação:

$$n = \frac{\log(P_{0,075}) - \log(100)}{\log\left(\frac{0,075}{D}\right)} \quad (4.2)$$

Onde:

$P_{0,075}$ = percentual passante na menor abertura de peneira da série, ou seja, 0,075 mm.

A partir do valor obtido para n, o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) (2006) classifica a curva granulométrica da seguinte forma:

- Agregado de graduação densa: $0,35 < n < 0,55$
- Agregado de graduação aberta: $0,55 < n < 0,75$
- Agregado tipo macadame: $D \cong 2d$ e $n \cong 1,0$.

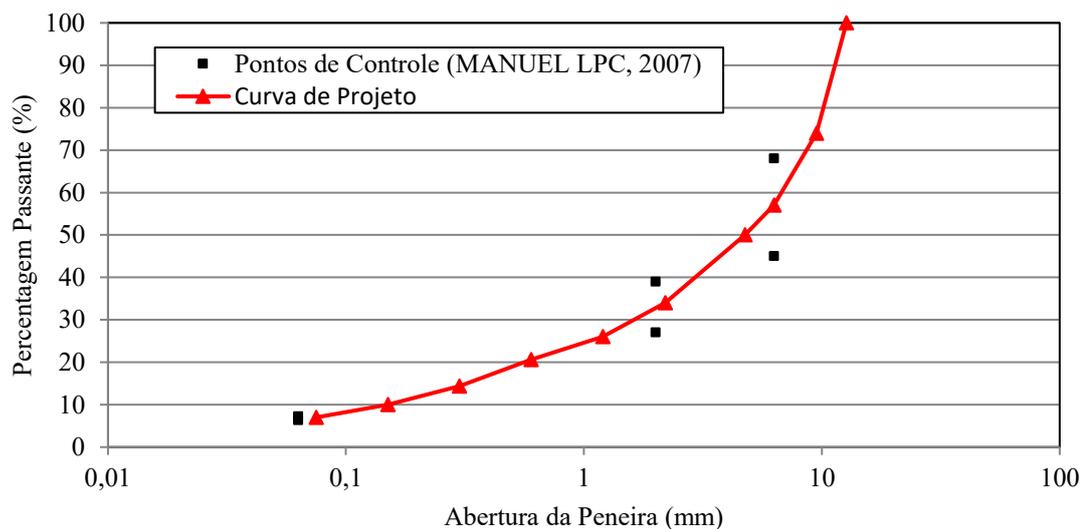
No que diz respeito a curva granulométrica utilizada neste trabalho, utilizou-se a mistura asfáltica do tipo *Béton Bitumineux Semi-Grenos* (BBSG), de graduação 0/14 mm, diâmetro máximo do agregado de 12,7 mm e percentual passante na menor abertura de peneira da série ($P_{0,075}$) de 7,0 %. A partir da Equação 4.3, obteve-se o expoente n o igual a 0,52, correspondendo a uma curva de graduação densa. A composição granulométrica utilizada foi a mesma estudada por Evaldt (2023), que realizou o estudo da mesma composição de mistura asfáltica, e está apresentada na Tabela 4.2 e Figura 4.1 com os respectivos pontos de controle indicados em Manuel LPC (2007).

Tabela 4.2 - Composição Granulométrica da mistura BBSG 0/14 mm.

ABERTURA DE PENEIRAS (mm)	PERCENTAGEM PASSANTE (%)	PERCENTAGEM RETIDA (%)
12,7	100,0	0,0
9,5	74,0	26,0
6,3	57,0	17,0
4,76	50,0	7,0,
2,2	34,0	160,
1,2	26,0	80
0,6	20,6	5,4
0,3	14,4	6,2
0,15	10,0	4,4
0,075	7,0	3,0
FUNDO	-	7,0

Fonte: Autora.

Figura 4.1 - Representação da curva de projeto BBSG 0/14 mm.



Fonte: Evaldt (2023).

4.2. CARACTERIZAÇÃO DA FIBRA DE SISAL

O processo de caracterização da fibra de sisal em laboratório envolve várias etapas, incluindo a coleta de amostras, a preparação das amostras, a realização de ensaios mecânicos e a análise dos resultados. A caracterização da fibra de sisal em laboratório é um processo importante para entender as propriedades físicas desse material natural e, assim, melhorar o seu desempenho em diversas aplicações industriais. Em vista disso, foram realizadas análises físicas da fibra de sisal em laboratório, como análises de microscopia para verificar a estrutura da fibra e a análise térmica para verificar a estabilidade térmica da fibra.

As análises laboratoriais foram realizadas no Laboratório de Caracterização Microestrutural (LACAMI) do Centro Tecnológico SATC, no município de Criciúma/SC. Os ensaios de caracterização realizados foram de microscopia eletrônica de varredura (MEV), espectrometria por fluorescência de Raios-X (FRX), difratometria de Raios-X (DRX), termogravimetria (TGA) e calorimetria diferencial (DSC), e espectroscopia infravermelha por transformada de Fourier (FTIR).

As amostras enviadas ao laboratório foram tratadas em trabalho anterior realizado por Evaldt (2023). Tais amostras de sisal foram separadas em maço de fios inteiros (Figura 4.2a) para a caracterização por MEV, e porções individuais de 5,0 g de fios cortados em 15 mm (Figura 4.2b) para as caracterizações por FRX e DRX (uma amostra para cada ensaio). Para análise da interação do sisal com o ligante asfáltico, foram enviadas amostras de aproximadamente 7,0 g de mástique do ligante asfáltico utilizado (CAP 30/45) com 0,3 % de sisal em relação ao volume de ligante (Figura 4.2c), amostras com 0,5 % de sisal (Figura 4.2d) e por fim uma amostra do ligante puro (Figura 4.4e) para obter parâmetros de comparação. Todas as amostras foram enviadas em estado semissólido e temperatura ambiente.

Figura 4.2 - Amostras enviadas para caracterização laboratorial: (a) fios de sisal inteiros, (b) sisal cortado em fios de 15 mm, (c) mástique de CAP 30/45 com 0,3 % de sisal, (d) mástique de CAP 30/45 com 0,5 % de sisal, e (e) CAP 30/45 puro.



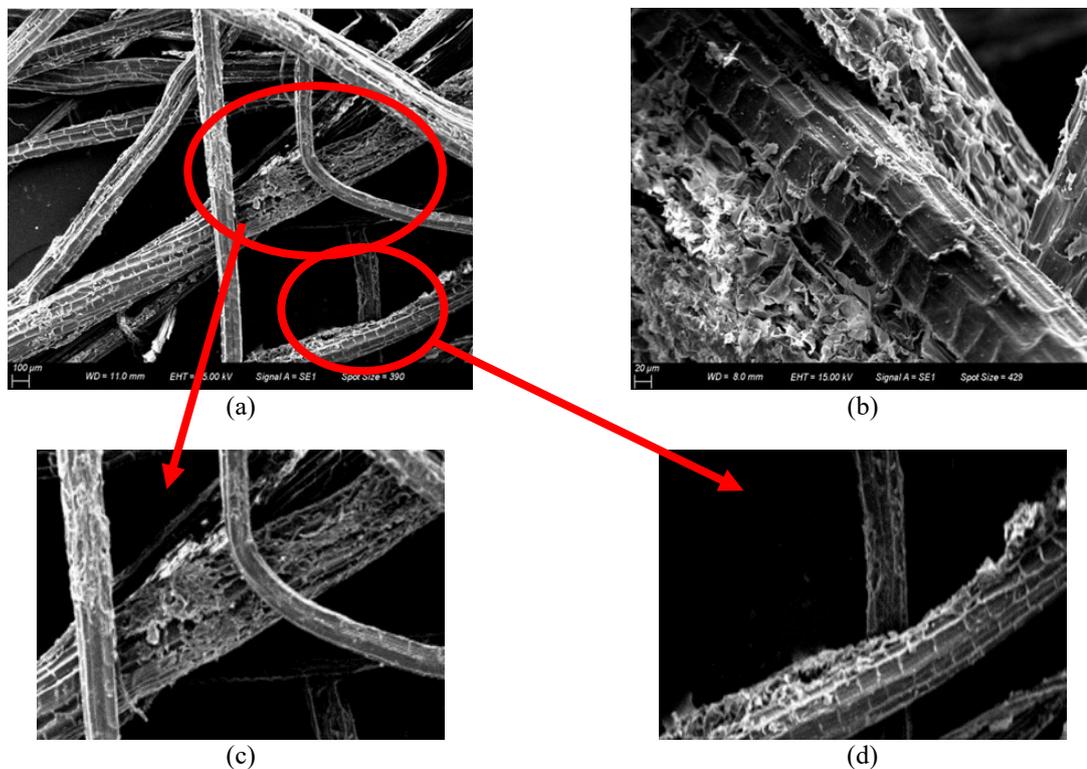
Fonte: Evaldt (2023).

As análises físicas da fibra de sisal em laboratório estão detalhas nos tópicos subsequentes.

4.2.1. Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

Através da microscopia eletrônica de varredura (MEV), pode-se observar que as fibras de sisal são formadas por fios longos com microfibrilas orientadas longitudinalmente, que se juntam em uma trama emaranhada, criando intervalos espaciais e agregando volume ao material (Figura 4.3a). A parede celular possui uma textura escamosa irregular composta principalmente por celulose, hemicelulose e lignina, que de acordo com estudos anteriores realizados por Martin *et al.* (2009), Mwaikambo e Ansell (2002) e Medina (1954), são responsáveis por tornar as fibras impermeáveis e rígidas. Os fios apresentam pontos de laceração ao longo do seu comprimento, que são causados pela raspagem mecânica das folhas da árvore *Agave Sisalana* durante o processo de desfibramento para separar a polpa das fibras.

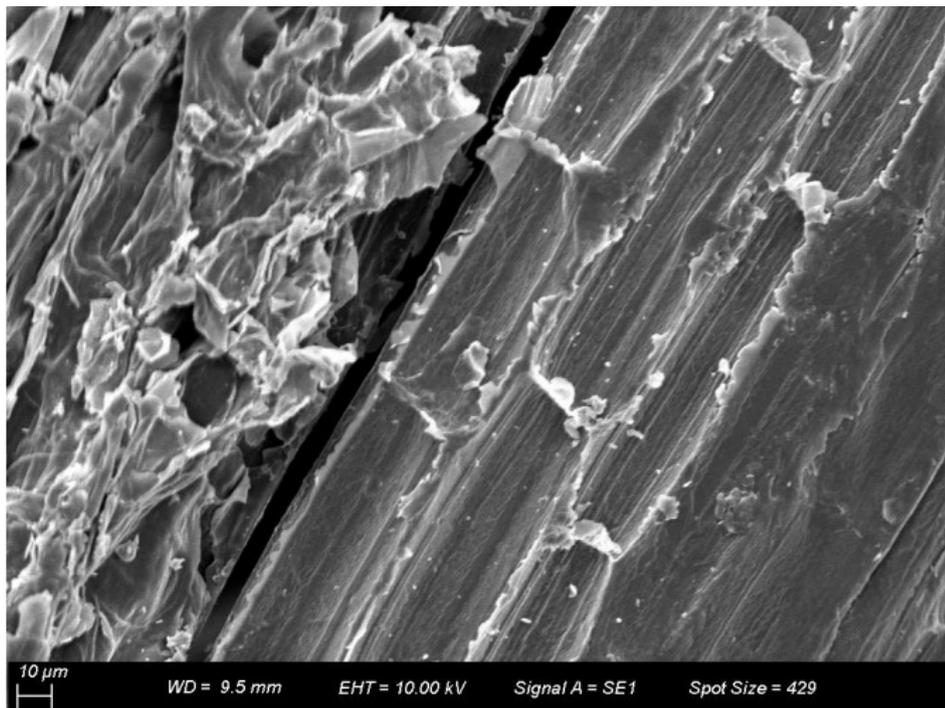
Figura 4.3 - Fibra de sisal: (a) visão geral dos fios (aumento de 390 vezes), (b) textura escamosa da parede celular (aumento de 429 vezes), (c) e (d) detalhes dos pontos de laceração dos fios.



Fonte: Autora.

A manipulação das fibras de sisal por operadores do equipamento desfibrador contribui para aderência e incrustação de partículas sólidas na superfície (Figura 4.4). Estudos têm demonstrado que o tratamento das fibras de sisal pode melhorar a união interfacial fibra-matriz (NARAYANA e RAO, 2021; VIGNESHWARAN *et al.*, 2020; NAVEEN, 2019), o que contribui para a aderência e incrustação de partículas sólidas na superfície.

Figura 4.4 - Partículas sólidas aderidas à parede dos fios da fibra de sisal (aumento de 429 vezes).



Fonte: Autora.

Foi constatada, por meio da análise de composição química utilizando a técnica de energia dispersiva (EDS) durante a microscopia eletrônica de varredura (Tabela 4.3), a presença significativa dos elementos Carbono (C) e Oxigênio (O) na parede celular das fibras de sisal. Essa presença pode ser explicada pela associação com o Cálcio (Ca) na formação do Carbonato (CaCO_3), um composto encontrado em grande quantidade nesse tipo de fibra (GUTIÉRREZ *et al.*, 2008).

Tabela 4.3 - Composição química determinada por meio da técnica de energia dispersiva (EDS) durante o procedimento de microscopia eletrônica de varredura (MEV).

Elemento	Massa (%)
Carbono (C)	45,54
Oxigênio (O)	37,40
Potássio (K)	6,60
Cálcio (Ca)	7,12
Magnésio (Mg)	1,85
Alumínio (Al)	1,49

Fonte: Autora.

4.2.2. Espectroscopia por fluorescência de Raio-X (RFX)

Através da utilização do equipamento Shimadzu, modelo EDX 7000, a composição química das fibras de sisal foi determinada por Espectrometria por Fluorescência de Raios-X (FRX), utilizando energia dispersiva. A Tabela 4.4 apresenta a distribuição percentual dos elementos obtidos.

Tabela 4.4 - Distribuição percentual dos elementos químicos componentes da fibra de sisal. por FRX.

Elementos	Teor (%)
CaO	49,566
TiO ₂	32,793
K ₂ O	9,075
Fe ₂ O ₃	2,761
Cr ₂ O ₃	2,218
ZnO	2,188
SO ₃	1,399
Total (%)	100,0

Fonte: Autora.

É importante ressaltar que as amostras analisadas não foram submetidas ao processo prévio de perda ao fogo (PF), pois, devido à característica natural da fibra de sisal ser semelhante à palha seca, essa etapa resultaria na carbonização dos fios em forma de pó, inviabilizando a análise do material. A análise por Espectrometria por Fluorescência de Raios-X (FRX) revelou que o Óxido de Cálcio (CaO) é o componente predominante na composição, o que pode ser explicado pelo fato de ser um elemento derivado do Carbonato de Cálcio (CaCO₃), um composto inorgânico naturalmente presente na parede celular das fibras de sisal, conforme mencionado na seção 4.2.1 sobre a Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).

Em relação ao Dióxido de Titânio (TiO_2), este não faz parte naturalmente da composição do material, mas sua presença significativa na amostra é resultado de uma aplicação comum na indústria como estabilizante térmico, fornecendo proteção aos fios contra os danos causados pela exposição às intempéries, especialmente à radiação ultravioleta (UV) (RADETIĆ, 2013).

O Potássio (K_2O) está associado às substâncias inorgânicas que não fazem parte da parede celular, que é composta principalmente por celulose, hemicelulose e lignina, conforme explicado na seção 4.2.1. O conteúdo e a proporção desses componentes variam de acordo com a espécie do material lignocelulósico, clima e condições do solo, representando cerca de 5,0 % a 20,0 % da biomassa (JESUS, 2018; VÁSQUEZ, 2017).

A participação dos elementos mais pesados, como Ferro (Fe_2O_3), Cromo (Cr_2O_3), Zinco (ZnO) e Enxofre (SO_3), bem como Alumínio (Al) e Magnésio (Mg), apresentados na Tabela 4.4 da análise por Energia Dispersiva (EDS) do MEV, ocorrem em concentrações muito baixas, dentro dos limites impostos pela norma ABNT NBR 10004 (2004), que identifica os resíduos perigosos em termos de toxicidade. Portanto, a fibra de sisal estudada pode ser classificada como Resíduo Não Perigoso, Classe II B, Inertes. Nesse contexto, é importante destacar que, apesar do baixo percentual desses elementos na composição das fibras de sisal estudadas, Dias (2009) destaca suas contribuições para outra utilidade desse material frequentemente observada na indústria agrícola: a formulação de fertilizantes para adubação de solos.

4.2.3. Difração de Raio-X (DRX)

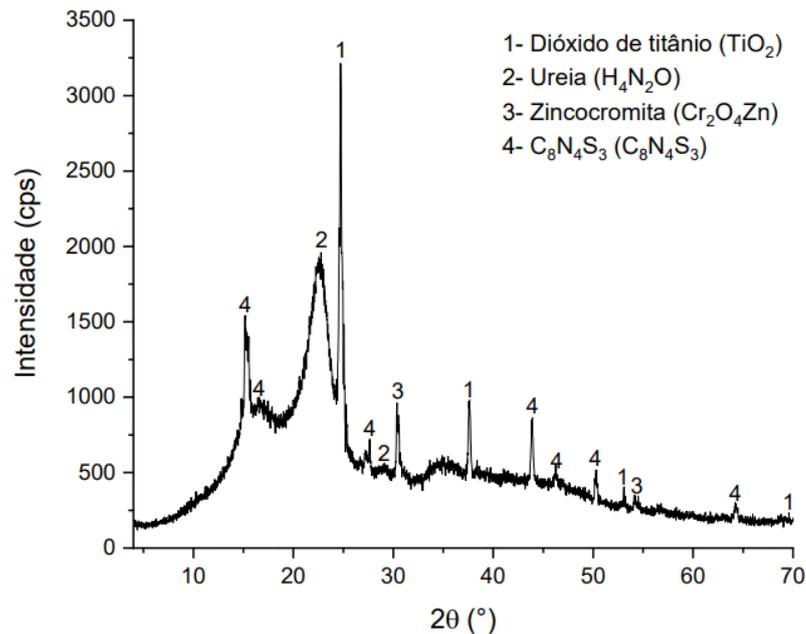
A análise difratométrica das fibras de sisal foi realizada com o uso do equipamento Shimadzu, modelo *LabX* XRD-6100. A identificação das fases (Tabela 4.5 e Figura 4.4) foi obtida a partir da comparação dos resultados com os difratogramas contidos no banco de dados *Crystallography Open Database* (COD 2018) utilizando o software *Match!3*.

Tabela 4.5 - Fases identificadas na análise difratométrica.

Fórmula Química	Nome do composto	Identificação
TiO_2	Dióxido de titânio	1
$\text{H}_4\text{N}_2\text{O}$	Ureia	2
$\text{Cr}_2\text{O}_4\text{Zn}$	Zincocromita	3
$\text{C}_8\text{N}_4\text{S}_3$	$\text{C}_8\text{N}_4\text{S}_3$	4

Fonte: Autora.

Figura 4.5 - Difratoograma das amostras de fibra de sisal.



Fonte: Autora.

Com base na análise do difratograma apresentado na Figura 4.5, observa-se que as fases metálico-cristalinas predominam na composição da fibra de sisal investigada. É relevante ressaltar que, durante o processo de estabilização térmica dos fios utilizando Dióxido de Titânio (TiO_2), geralmente adiciona-se Ureia ($\text{H}_4\text{N}_2\text{O}$) a fim de produzir uma reação exotérmica de combustão não explosiva (GÓES, 2006).

No entanto, é possível notar que os picos que correspondem à fase de Ureia apresentam um bom espaçamento, tanto no de maior intensidade quanto no de menor intensidade, acompanhados de uma linha radioativa irregular (ruídos). Essas características indicam a formação de cristalitos pequenos e uma elevada porcentagem de amorfos nas amostras, provenientes da expressiva presença de celulose, hemicelulose e lignina, conforme descrito na seção 4.2.1 do MEV. Esses fatores reduzem a reatividade da Ureia no processo exotérmico (KIKUKAWA *et al.*, 2004).

No que diz respeito à indústria agrícola, uma das alternativas para melhorar o valor nutritivo do resíduo do sisal utilizado em fertilizantes é o tratamento químico com Ureia, que diminui as barreiras físico-químicas da digestão da parede celular por microrganismos e aumenta o teor de nitrogênio (FARIA *et al.*, 2008).

A fase de Zincocromita ($\text{Cr}_2\text{O}_4\text{Zn}$) é proveniente do grupo dos espinélios (YAN *et al.*, 1999), que formam cristais resultantes da associação dos metais Zinco (Zn) e Cromo (Cr)

presentes em menor escala na composição química das fibras de sisal estudadas (ver Tabela 4.2.2).

Os Tiacianocarbonos ($C_8N_4S_3$) pertencem ao grupo dos cianos, que produzem cristais amarelados, insolúveis em água e petróleo, mas não resistentes às cetonas. Esses compostos estão associados aos compostos parafínicos, que constituem as resinas presentes na parede celular das fibras de sisal. Além disso, são eficazes como fungicidas (SIMMONS *et al.*, 1962; VAN SCHOOR *et al.*, 1961).

Portanto, a partir das análises realizadas na caracterização das amostras, pode-se concluir que as fibras de sisal utilizadas neste estudo não se encontram em seu estado natural, como obtidas imediatamente após o desfibramento mecânico no campo, uma vez que já foram submetidas a processos químicos industriais com o objetivo de torná-las mais resistentes e multifuncionais.

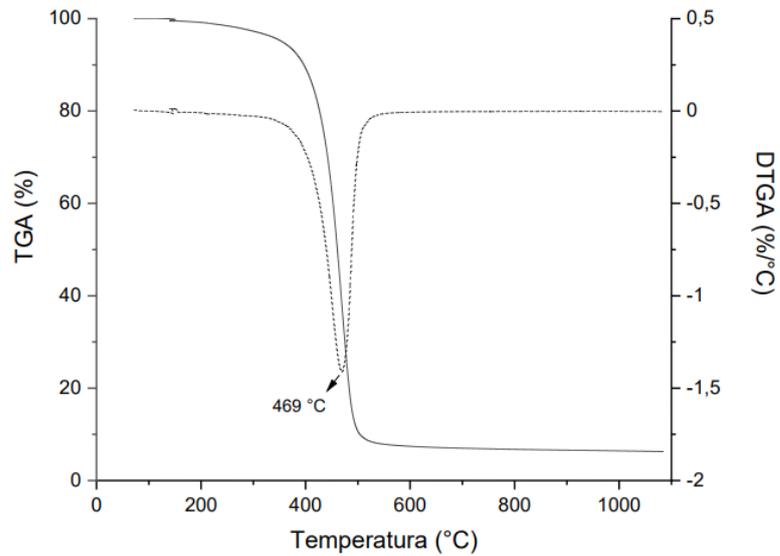
4.2.4. Termogravimetria (TGA) e calorimetria diferencial (DSC)

A análise da perda de massa da fibra de sisal foi conduzida em função do aumento gradual da temperatura com o objetivo principal de determinar a temperatura a partir da qual o material começa a perder massa significativamente quando misturado ao ligante betuminoso, indicando que a partir desse ponto as fibras não contribuem mais gradualmente com suas propriedades para a formulação das misturas asfálticas.

A avaliação foi realizada utilizando o Analisador Termogravimétrico e de Calorimetria Diferencial (TGA / DSC) da *TA Instruments*, modelo *Discovery* SDT 650. Em todos os testes, a temperatura foi elevada de 50 °C a 1100 °C, com taxa de aquecimento de 10 °C/min, sob atmosfera de ar sintético. Os dados foram analisados com o auxílio do *software TRIOS*.

Para a amostra de ligante betuminoso + 0,3 % de sisal, a perda de massa total foi de 93,77 %, sendo que um evento exotérmico observado a 469 °C foi responsável por 89,67 % dessa perda de massa. A Figura 4.6 ilustra a evolução da perda de massa (TGA) e sua primeira derivada (DTGA), representadas pelas linhas cheia e tracejada, respectivamente.

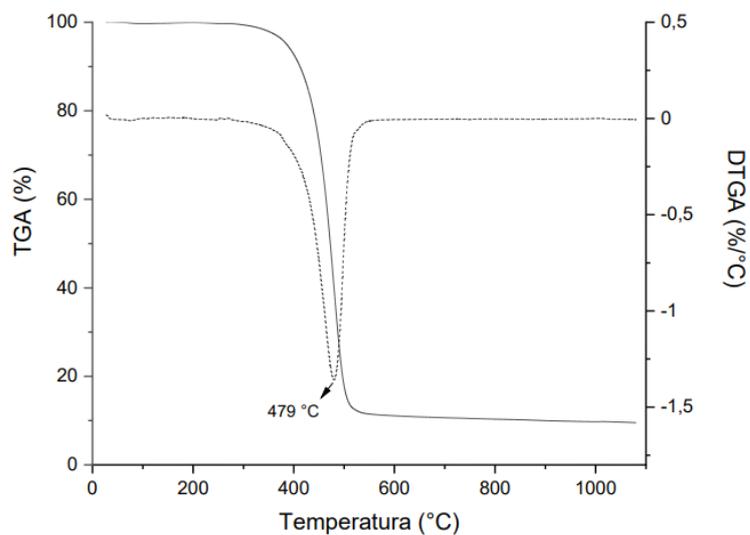
Figura 4.6 - TGA/DTGA da amostra de ligante betuminoso + 0,3 % de sisal.



Fonte: Autora.

Foi observado um cenário semelhante para a amostra de ligante betuminoso com adição de 0,5 % de sisal. A perda total de massa obtida foi de 90,56 %, sendo que um evento exotérmico ocorreu a uma temperatura de 479 °C, o qual foi responsável por 88,32 % da perda de massa. A Figura 4.7 apresenta a evolução da perda de massa (TGA) e sua primeira derivada (DTGA), representadas pela linha cheia e tracejada, respectivamente.

Figura 4.7 - TGA/DTGA da amostra de ligante betuminoso + 0,5 % de sisal.



Fonte: Autora.

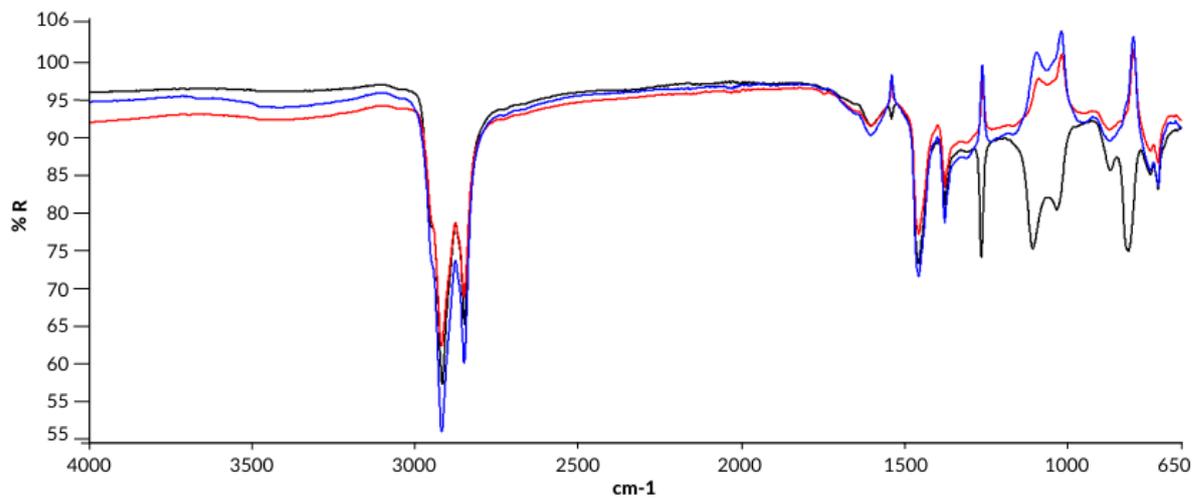
A análise dos termogramas das amostras indica que as curvas termogravimétricas (TGA) sofreram perdas de massa não significativas até a temperatura de 400 °C, principalmente devido à evaporação das frações leves do ligante betuminoso. Isso sugere que as fibras de sisal apresentam pouca susceptibilidade térmica devido ao seu encapsulamento pelo agente aglutinante. No entanto, os fenômenos exotérmicos observados após 460 °C indicam a degradação estrutural tanto do ligante betuminoso quanto das fibras de sisal. Como resultado, os percentuais de perda de massa são praticamente totais durante todo o processo termogravimétrico, conforme indicado pelas taxas percentuais de perda por unidade de temperatura nas curvas correspondentes às primeiras derivadas (DTGA).

O composto responsável pela boa resistência das fibras de sisal ao processo termogravimétrico é o dióxido de titânio (TiO₂), que está presente em quantidade expressiva na composição química das amostras. O TiO₂ é reconhecido por apresentar excelente atividade fotocatalítica, ser biocompatível e não tóxico, além de possuir propriedades antimicrobianas e de proteção UV, como indicado por Cadorin *et al.* (2021) e Radetić (2013). Isso sugere que a presença de TiO₂ pode ter contribuído para a boa resistência térmica das fibras de sisal observada nas amostras analisadas.

4.2.5. Espectroscopia infravermelha por transformada de Fourier (FTIR)

As análises foram conduzidas por meio da técnica de Espectroscopia Infravermelha por Transformada de Fourier (FTIR), utilizando o *software Spectrum* e o método de Reflexão Total Atenuada Universal (UATR). Os espectros resultantes foram apresentados em percentual de refletância (% R) em função do comprimento de onda (cm⁻¹) na Figura 4.8.

Figura 4.8 - Espectros por FTIR das amostras: (vermelha) ligante betuminoso puro, (azul) ligante betuminoso + 0,3 % de sisal, e (preta) ligante betuminoso + 0,5 % de sisal.



Fonte: Autora.

Ao analisar comparativamente os resultados do ensaio de FTIR, é possível observar uma estabilidade espectral de todas as amostras na faixa de comprimentos de onda entre 4000 cm^{-1} e 3000 cm^{-1} , bem como entre 2700 cm^{-1} e 1600 cm^{-1} . Na primeira faixa, é evidente a presença de bandas suaves na região entre 3400 cm^{-1} e 3100 cm^{-1} , causadas pela presença de grupos relacionados às ligações com o átomo de Hidrogênio (H), ou seja, as pontes de Hidrogênio, especialmente o Oxigênio (O–H) e o Nitrogênio (N–H). É importante notar que os grupos O–H estão correlacionados à formação de grupos carboxílicos, mas também podem ser atribuídos à umidade presente nas amostras, provenientes tanto da higroscopia resultante do processo de lavagem em água das fibras de sisal após o processo de desfibramento quanto da presença de Hidroxila (OH) na composição natural das fibras de sisal, como mencionado na seção 4.1.2 correspondente à Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).

No segundo intervalo, podem-se observar bandas isoladas em 1700 cm^{-1} relacionadas à formação de grupos carbonílicos (C=O), com destaque para a presença de ácidos carboxílicos, aldeídos, amidas, anidridos, cetonas e ésteres. Na faixa entre 2900 cm^{-1} e 2700 cm^{-1} , as inflexões resultam do alongamento das vibrações das cadeias asfálticas dos grupos C–H, que caracterizam a natureza do ligante betuminoso como hidrocarboneto, constituindo a maior porcentagem de sua composição química (LEITE e MENEZES, 2003).

Na região de 1500 cm^{-1} a próximo de 1100 cm^{-1} , ocorrem diversas variações de bandas atribuídas às ligações moderadas de massa do grupo C–O e C–N, principalmente nas amostras do ligante betuminoso puro e com adição de 0,3 % de fibra de sisal. Na região em torno de 1000

cm^{-1} , destaca-se um pico invertido da amostra com adição de 0,5 % de fibra de sisal, relacionado à presença do grupo sulfóxido (S=O), proveniente da união dos percentuais de Enxofre (S) existentes na composição do ligante betuminoso e da própria fibra, neste caso em maior concentração entre todas as amostras analisadas.

Abaixo de 1000 cm^{-1} , os picos espectrais observados resultam de várias ligações dos átomos de Carbono, Nitrogênio, Oxigênio e Enxofre com metais presentes em pequenas concentrações na composição amostral, conforme as informações apresentadas nas Tabelas 4.3 e 4.4. É importante salientar que as descrições espectrais apresentadas estão em conformidade com pesquisas realizadas por diversos autores (BASSYOUNI, 2018; MENAPACE *et al.*, 2017; YU *et al.*, 2014; SULTANA e BHASIN, 2014; ARAUJO *et al.*, 2013).

4.3. CARACTERIZAÇÃO DO LIGANTE BETUMINOSO

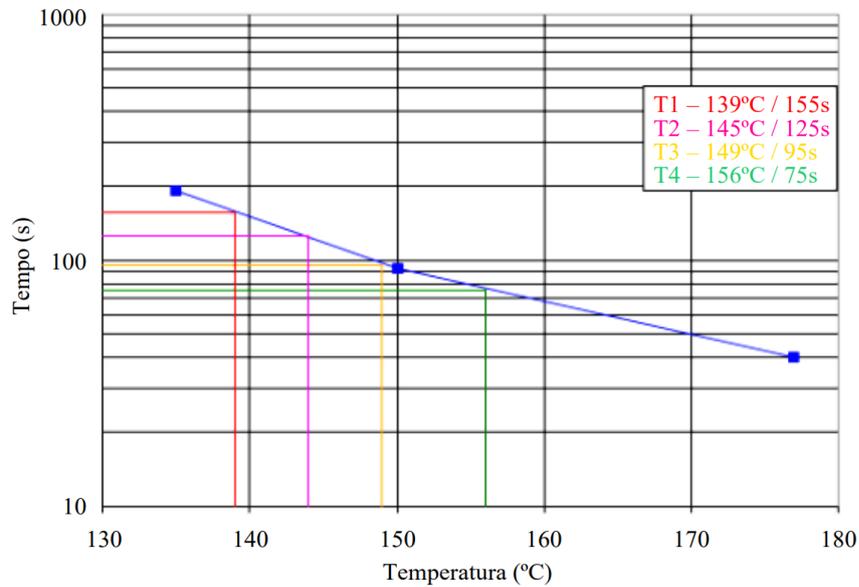
Nesta pesquisa, foi utilizado um cimento asfáltico de petróleo (CAP) produzido pela refinaria REPLAN da Petrobrás em Paulínia/SP, com uma penetração de 30/45 (0,1 mm) e fornecido pela empresa CBB Asfaltos, que possui uma planta industrial na cidade de Curitiba/PR. Os dados técnicos do ligante já foram fornecidos pela refinaria por meio de um laudo técnico e estão resumidos na Tabela 4.6 e na Figura 4.9.

Tabela 4.6 - Laudo técnico do ligante asfáltico.

Características	Método	Resultado	Especificação	Unidade
Penetração	D 5	34	30 a 45	0,1 mm
Ponto de amolecimento	D 36	53,5	52 mín.	°C
Ductilidade a 25 GC	D 113	> 150	60 mín.	% massa
Solubilidade no tricloroetileno	D 2042	99,9	99,5 mín.	°C
Ponto de fulgor	D92	352	235 mín.	-
Índice de suscetibilidade térmica	X 18	-1,2	-1,5 a 0,7	-
Densidade relativa a 20/4 °C	D 70	1,01	-	-
Aquecimento a 177GC	X 215	Não esp.	Não espuma	-

Fonte: REPLAN (2018).

Figura 4.9 - Curva de viscosidade Saybolt-Furol para o CAP 30/45.



Fonte: REPLAN (2018).

A partir da análise da Tabela 4.2, pode-se concluir que o ligante atende aos requisitos técnicos especificados pelas normativas. A curva de viscosidade Saybolt-Furol fornece informações sobre a capacidade do CAP de fluir sob diferentes condições de temperatura. A curva apresentada na Figura 4.9 indica, portanto, que a temperatura ideal para compactação é de 145 °C e a temperatura ideal para usinagem é de 155 °C. Essas temperaturas foram adotadas para a execução da mistura em laboratório. A partir da temperatura de usinagem foi possível determinar a temperatura de aquecimento dos granulares, utilizada em um intervalo de 10 °C a 15 °C acima do valor adotado para usinagem conforme indica a norma DNIT ES-031 (2006).

4.4. SEPARAÇÃO DAS AMOSTRAS DE FIBRA DE SISAL

Conforme citado no item 3.2.1, é recomendado na literatura o corte das fibras no tamanho entre 10 mm e 15 mm. Nesta pesquisa foi adotado o tamanho de 15 mm em consonância com trabalho anterior desenvolvido por Evaldt (2023). Seguindo a mesma metodologia de preparação das amostras, a figura 4.10 ilustra como ocorreu o corte das fibras com o auxílio de um gabarito de madeira frisado a 15 mm da borda externa (Figura 4.10a).

Figura 4.10 - Processo de corte e separação das amostras da fibra de sisal.



Fonte: Autora.

A dosagem das fibras para a produção das amostras foi realizada em relação ao volume de mistura asfáltica e convertido em peso a partir do conhecimento da densidade aparente da mistura (MVA). O cálculo da quantidade de sisal em peso está demonstrado na sequência.

$$P_{sisal} = dA_{mistura} \times V_{sisal} \quad (4.3)$$

Onde:

P_{sisal} = peso das fibras de sisal para produção das amostras;

$dA_{mistura}$ = densidade aparente da mistura asfáltica (MVA);

V_{sisal} = volume de fibras de sisal.

$$V_{sisal} = V_{mistura} \times \left(\frac{\%Sisal}{100} \right) \quad (4.4)$$

Onde:

V_{sisal} = volume de fibras de sisal;

$V_{mistura}$ = volume de mistura, obtido a partir das medidas dos corpos de prova;

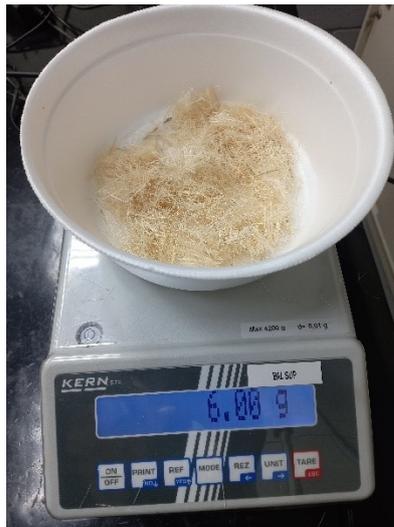
%Sisal = percentual de 0,3 ou 0,5 utilizado para dosagem das fibras de sisal nesta pesquisa.

O peso de sisal, portanto, será calculado de acordo com a seguinte equação:

$$P_{sisal} = dA_{mistura} \times V_{mistura} \times \left(\frac{\%Sisal}{100} \right) \quad (4.5)$$

Para controle da produção em laboratório na produção das amostras, as fibras foram pesadas com o auxílio de uma balança digital de precisão de $\pm 0,01$ g modelo *Kern 572* (Figura 4.11). Após pesagem as amostras foram acondicionadas em recipientes descartáveis (Figura 4.11).

Figura 4.11 - Pesagem e separação das amostras de fibra de sisal.



Fonte: Autora.

Após pesagem e separação das fibras, prosseguiu-se para o processo de produção das amostras e ensaios laboratoriais conforme descrito nos tópicos subsequentes.

4.5. ENSAIOS LABORATORIAIS

Os ensaios laboratoriais foram realizados com o objetivo de avaliar as propriedades físicas e mecânicas da mistura asfáltica e determinar a sua composição ideal. Foram analisadas diversas propriedades, incluindo a massa volumétrica real, bem como aquelas obtidas por meio

do ensaio Marshall, tais como estabilidade, fluência, densidade, vazios de ar, vazios preenchidos com asfalto e teor de asfalto. Adicionalmente, a resistência à tração diametral e à penetração também foram medidas e avaliadas.

4.5.1. Massa específica volumétrica real (MVR)

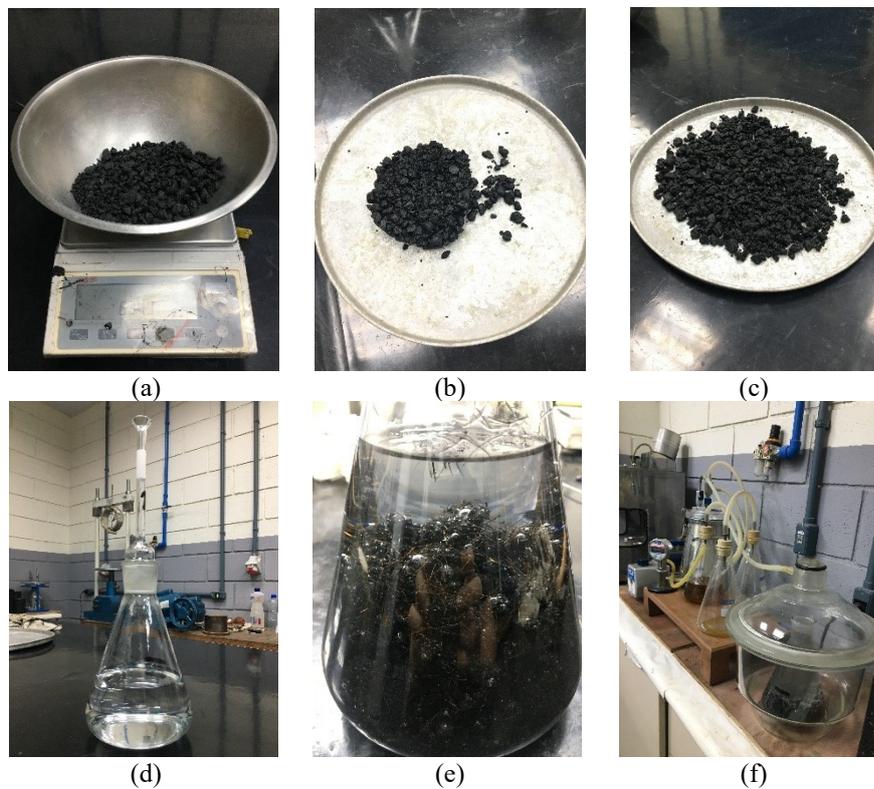
O ensaio de massa específica volumétrica real é realizado para determinar a massa específica do material de uma mistura betuminosa, também conhecida como massa volumétrica real. O ensaio foi realizado previamente em estudo desenvolvido por Evaldt (2023) conforme ilustrado na Figura 4.12. O método de ensaio é descrito na norma AFNOR NF EN 12697-5 (2019) e envolve as seguintes etapas:

1. Preparação da amostra: A amostra da mistura asfáltica foi preparada aquecendo-se o ligante betuminoso a 155 °C conforme o item 4.3 do presente trabalho. Da mesma forma, os granulares foram aquecidos a 168 °C. Por fim, os materiais foram misturados para produção das amostras de referência, e as amostras de estudo, foram acrescidas a fibra de Sisal;
2. Separação da amostra: Uma amostra representativa da mistura asfáltica com 635 g, o que equivale a 50 vezes o diâmetro máximo da curva granulométrica (12,7 mm), é separada para a realização deste ensaio (Figura 4.12a);
3. Produção da amostra: A amostra é então espalhada em uma bandeja para resfriamento pelo período de 24 horas (Figura 4.12b). Após o completo resfriamento, separa-se manualmente os grumos da mistura, contudo, toma-se o cuidado em não fissurar a película de ligante e não provocar quebra do material granular (Figura 4.12c);
4. Medição das massas: A massa de um picnômetro com volume conhecido é medida a seco e em seguida com 800 ml de água (Figura 4.12d). Após este procedimento, a amostra é adicionada ao interior do picnômetro com água (Figura 4.12e) e o conjunto alocado sem rolha no dessecador da bomba de vácuo por 2 horas a 350 mmHg para retirar o ar presente nos interstícios (Figura 4.12f);
5. Medição final: A massa do conjunto picnômetro, amostra e água até o menisco da rolha é medida;
6. Cálculo da massa específica volumétrica real (Equação 4.6): A massa específica volumétrica real da amostra é calculada dividindo-se a massa da amostra pelo volume dela. O resultado é expresso em unidades de massa/volume (g/cm^3);

7. Repetição: O ensaio é repetido para duas amostras de cada teor de ligante estudado para garantir a precisão dos resultados (Tabela 4.7).

O resultado do ensaio é a média das determinações da massa específica volumétrica real de cada mistura betuminosa e estão apresentados na Tabela 4.7 e ilustrados na Figura 4.12.

Figura 4.12 - Procedimento do ensaio de MVR: (a) peso da amostra seca, (b) amostra na bandeja para resfriamento; (c) separação dos grumos da amostra; (d) picnômetro preenchido com água; (e) conjunto preenchido com água e a amostra; (f) amostra no dessecador.



Fonte: Evaldt (2023).

O cálculo da massa volumétrica real (MVR) é realizado através das equações:

$$MVR = \left(\frac{P_{amostra}}{V_{amostra}} \right) \quad (4.6)$$

$$V_{amostra} = V_{picnômetro} \left(\frac{P_3 - P_{amostra} - P_{picnômetro+rolha}}{\rho_{água}} \right) \quad (4.7)$$

Onde:

MVR: massa volumétrica real da mistura asfáltica, em g/cm³;

$P_{amostra}$: peso da amostra, em g;

$V_{amostra}$: volume da amostra, em cm^3 ;

$V_{picnômetro}$: volume do picnômetro até a marcação da rolha, em cm^3 ;

P_3 : peso do conjunto picnômetro, rolha, água até a marcação e amostra, em g;

$P_{picnômetro+rolha}$: peso do picnômetro e rolha, em g;

$\rho_{\text{água}}$: massa específica da água, em g/cm^3 .

Tabela 4.7 - Resultados da massa volumétrica real (MVR) das amostras.

Teor CAP	Referência	0,3% sisal	0,5% sisal
4,22 %	2,543	-	-
4,54 %	2,534	-	-
4,70 %	2,525	-	-
4,86 %	2,518	-	-
5,18 %	2,509	2,485	-
5,50 %	2,498	2,476	2,473
5,82 %	2,487	2,466	2,465
6,14 %	2,476	-	2,454

Fonte: Autora.

4.5.2. Preparação e mistura das amostras

O processo de separação dos materiais, preparo e confecção das amostras seguiu os mesmos passos para todos os ensaios descritos nos itens subsequentes. Contudo, diferentemente das amostras de referência, nas amostras com fibra de sisal, um passo a mais foi adicionado para incorporar a fibra na mistura. O processo ocorreu de acordo com as seguintes etapas:

1. Preparação da amostra: As amostras foram produzidas seguindo as temperaturas de usinagem ($155\text{ }^{\circ}\text{C}$) e compactação ($145\text{ }^{\circ}\text{C}$) descritas no item 4.3. As amostras de referência e as formuladas com incorporação de 0,3 % e 0,5 % de sisal, foram dosadas em diferentes teores para cada ensaio (Tabela 4.8);
2. Escolha dos teores de ligante (Tabela 4.8): Para o ensaio Marshall, foram compreendidos oito teores de ligante, a saber: 4,22 %, 4,54 %, 4,70 %, 4,86 %, 5,18 %, 5,50 %, 5,82 % e 6,14 %. A partir dos resultados do ensaio Marshall, a faixa de trabalho de 4,86 % e de 6,14 %, para as amostras com 0,3 % de sisal foram dosadas (Tabela 4.8). E de forma similar, as amostras com 0,5 % de incorporação de fibras tiveram seu teor de ligante dosados entre 5,50 % e 6,14 % (Tabela 4.8);

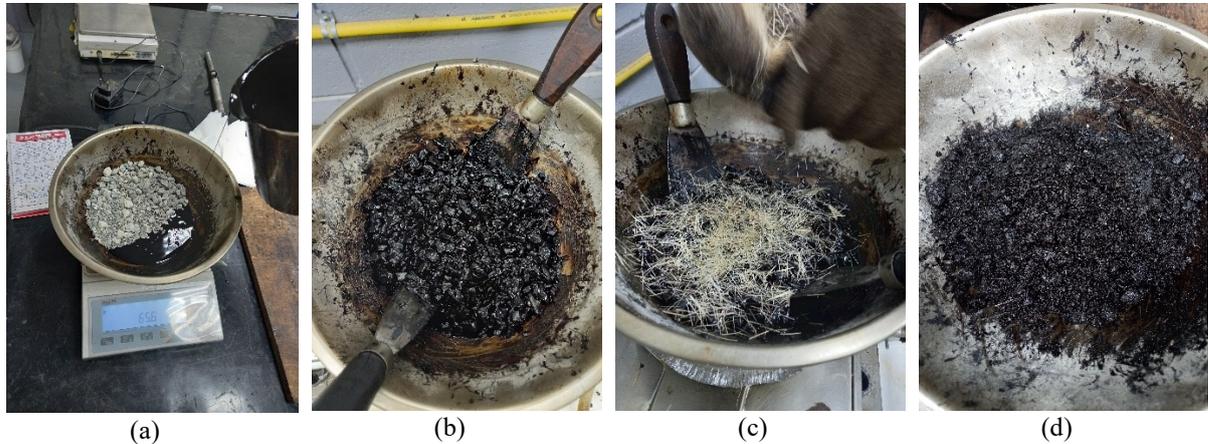
3. Seleção de granulares e determinação da granulometria: De acordo com o descrito no item 4.1, a granulometria é determinada por meio de peneiramento e a equação do método teórico. Para tanto, as peneiras utilizadas foram as de abertura de 0,075 mm, 0,15 mm, 0,30 mm, 0,60 mm, 1,20 mm, 2,20 mm, 4,76 mm, 9,50 mm e 12,70 mm;
4. Produção da mistura: Os agregados aquecidos a uma temperatura de 13 °C acima da temperatura de usinagem do ligante (168 °C) são misturados com o ligante betuminoso. O procedimento ocorreu através das seguintes etapas:
 - a. Amostras de referência: O primeiro passo foi adicionar o ligante betuminoso nas frações granulares graúdas e misturar (Figura 4.13a). Após completa cobertura e formação de um filme de ligante em torno dos grãos (Figura 4.13b), foram adicionados as frações de grãos intermediários e a fração de finos (passantes na peneira de 0,075 mm). A etapa de adição da granulometria fina é importante pois aumenta a espessura de ligante que envolve o granular graúdo;
 - b. Amostras com a incorporação da fibra de sisal: O procedimento é feito da mesma forma que as amostras de referência, porém, as fibras são adicionadas antes das frações intermediárias e finas de granulares (Figura 4.13c). Desta forma, verificou-se em laboratório que as fibras proporcionam um melhor envolvimento com o ligante, menor formação de grumos e aumentam a espessura de ligante que envolve o granular graúdo;
5. Acondicionamento das amostras: Após o processo de mistura das amostras (Figura 4.13d), elas são levadas para uma estufa por duas horas na temperatura de compactação a fim de volatilizar o ligante e dar o determinado tempo para as reações químicas ocorrerem até que cheguem na temperatura correta.

Tabela 4.8 - Teores de CAP para a produção das amostras para os ensaios de MVR, Duriez e tração indireta.

Referência	0,3 % de fibra de sisal	0,5 % de fibra de sisal
4,70 %	-	-
4,86 %	-	-
5,18 %	5,18 %	-
-	5,50 %	5,50 %
-	5,82 %	5,82 %
-	-	6,14 %

Fonte: Autora.

Figura 4.13 - Processo de produção das amostras: (a) Adição de ligante aos granulares graúdos, (b) mistura e envolvimento dos granulares graúdos, (c) adição da fibra de sisal, (d) mistura após adição das frações intermediárias e finas.



Fonte: Autora.

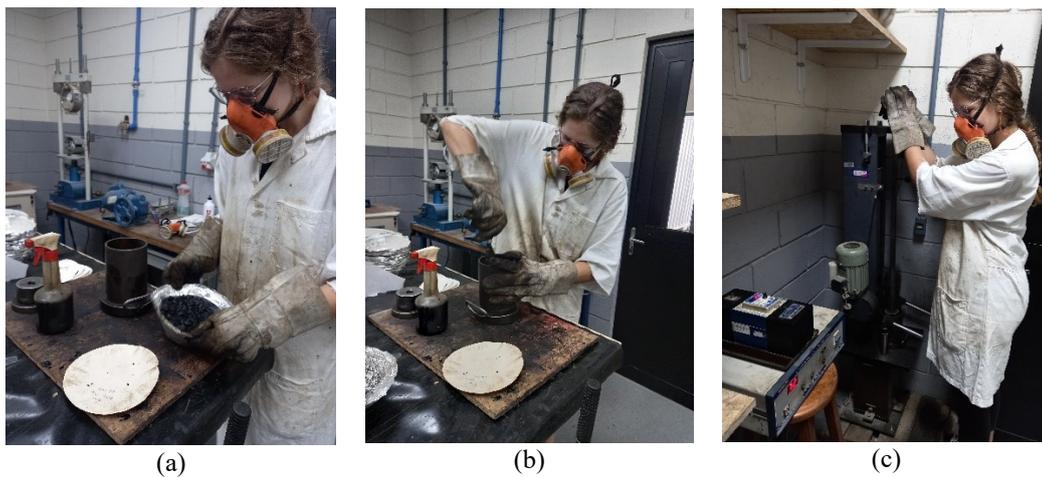
4.5.3. Metodologia Marshall

A metodologia Marshall é um método utilizado para a avaliação da estabilidade e resistência de misturas asfálticas. Ela é amplamente utilizada na engenharia de pavimentos para determinar a capacidade de uma mistura de suportar cargas repetidas sem deformação permanente ou danos ao revestimento asfáltico. O procedimento é descrito na norma DNER ME-043 (1995) e envolve as seguintes etapas:

1. Pré compactação: Após o procedimento descrito no item 4.5.2, a mistura é despejada em um molde cilíndrico de dimensões conhecidas e pré-aquecido na temperatura de compactação da amostra (Figura 4.14a). A pré compactação é realizada em camadas sucessivas através de espatulação da amostra, onde a cada camada são aplicados 25 golpes utilizando uma espátula metálica (15 golpes nas bordas e 10 golpes no centro) a fim de proporcionar uma pré densificação da amostra e homogeneização (Figura 4.14b). Por fim, com o auxílio da espátula nivela-se a superfície;
2. No interior do cilíndrico são adicionados papel filtro na base e na superfície da amostra para que não ocorra aderência do material com os equipamentos de compactação;
3. Compactação: O conjunto é levado ao equipamento Marshall para compactação, onde a amostra sofrerá 75 golpes aplicados em cada face (Figura 4.14c);
4. Desmolde: O molde contendo a amostra compactada é cuidadosamente removido com o auxílio de um extrator hidráulico após o resfriamento, evitando perda de material e

- deformação da amostra compactada. As amostras são acondicionadas para ficarem em um repouso de no mínimo 24 horas;
5. Medição da altura e diâmetro: A altura da amostra compactada é medida com o auxílio de um paquímetro em três posições distintas. Da mesma forma, o diâmetro da amostra compactada é medido em três direções diferentes, e a média das medições é calculada;
 6. Determinação da massa específica aparente (MEA): A massa específica aparente da amostra é determinada dividindo-se a massa da amostra seca pelo seu volume aparente, obtido a partir da medida de sua altura e diâmetro;
 7. Ensaio de estabilidade e deformação: A amostra é submetida a ensaios de compressão diametral para determinar sua estabilidade e resistência à deformação permanente (fluência).

Figura 4.14 - Processo de moldagem e compactação das amostras: (a) inserção da amostra no molde, (b) espatulação da amostra, (c) compactação no soquete Marshall.



Fonte: Autora.

As equações utilizadas para a determinação de cada propriedade física estão descritas na sequência.

A massa específica aparente (MEA) dos corpos de prova, em g/cm^3 , é determinada através da Equação 4.7.

$$MEA = \frac{P_s}{\pi \times R^2 \times h_m} \quad (4.7)$$

Onde:

P_s : peso seco do corpo de prova, em g;

R : raio do corpo de prova, em cm;

h_m : altura média, em cm.

O teor de vazios (%V) das amostras, em %, é determinado através da Equação 4.8.

$$\%V = \frac{100 \times (MVR - MEA)}{MVR} \quad (4.8)$$

Onde:

MVR : massa volumétrica real do corpo de prova (Equação 4.6), em g/cm³;

MEA : massa específica aparente do corpo de prova (Equação 4.7), em g/cm³.

O Vazios Cheios com Betume (VCB), em %, é determinado através da Equação 4.9.

$$\%VCB = \frac{MEA \times \%L}{D_{ligante}} \quad (4.9)$$

Onde:

$\%L$: teor de ligante, em %;

$D_{ligante}$: massa específica do ligante betuminoso, em g/cm³.

A percentagem de vazios do agregado mineral (%VAM), em %, é determinada através da Equação 4.10.

$$\%VAM = \%V + \%VCB \quad (4.10)$$

A relação betume/vazios (%RBV), em %, é determinada através da Equação 4.11.

$$\%RBV = \frac{100 \times \%VCB}{\%VAM} \quad (4.11)$$

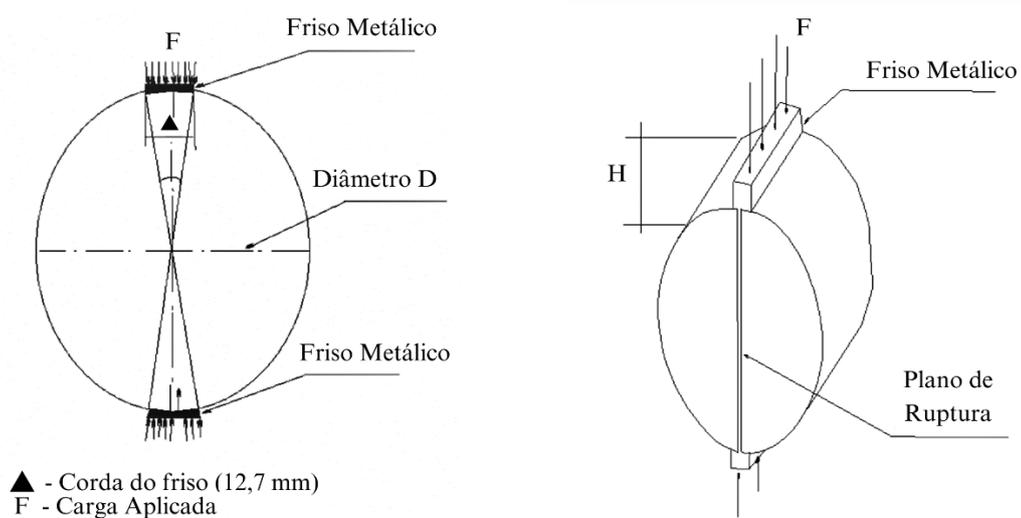
O resultado do ensaio é a determinação das propriedades físicas das amostras, e em seguida, a estabilidade e deformação permanente da mistura, que são expressas em unidades de

força e deformação, respectivamente. Essas informações são utilizadas para definir o teor adequado de ligante betuminoso que atenda a todos os critérios estabelecidos pela norma DNER ME-043 (1995).

4.5.4. Resistência à tração por compressão diametral

A resistência à tração por compressão diametral é um ensaio mecânico utilizado para medir a resistência de corpos de prova cilíndricos moldados pelo soquete Marshall. A norma DNIT-ME 136 (2018) especifica o procedimento para realização deste ensaio, que consiste basicamente na aplicação de uma carga compressiva diametral ao corpo de prova, transmitidas a partir de frisos que geram tração perpendicular à aplicação da carga até que ocorra sua ruptura (Figura 4.15).

Figura 4.15 - Ensaio por compressão diametral.



Fonte: DNIT-ME 136 (2018).

A carga aplicada é monitorada até a ocorrência da ruptura do corpo de prova. A resistência à tração por compressão diametral é calculada utilizando-se a fórmula estabelecida na norma, que leva em consideração as dimensões do corpo de prova e a carga aplicada no momento da ruptura (Equação 4.12).

$$\sigma_R = RTI = \frac{2F}{\pi \times D \times H} \quad (4.12)$$

Onde:

σ_R : resistência à tração indireta, em MPa;

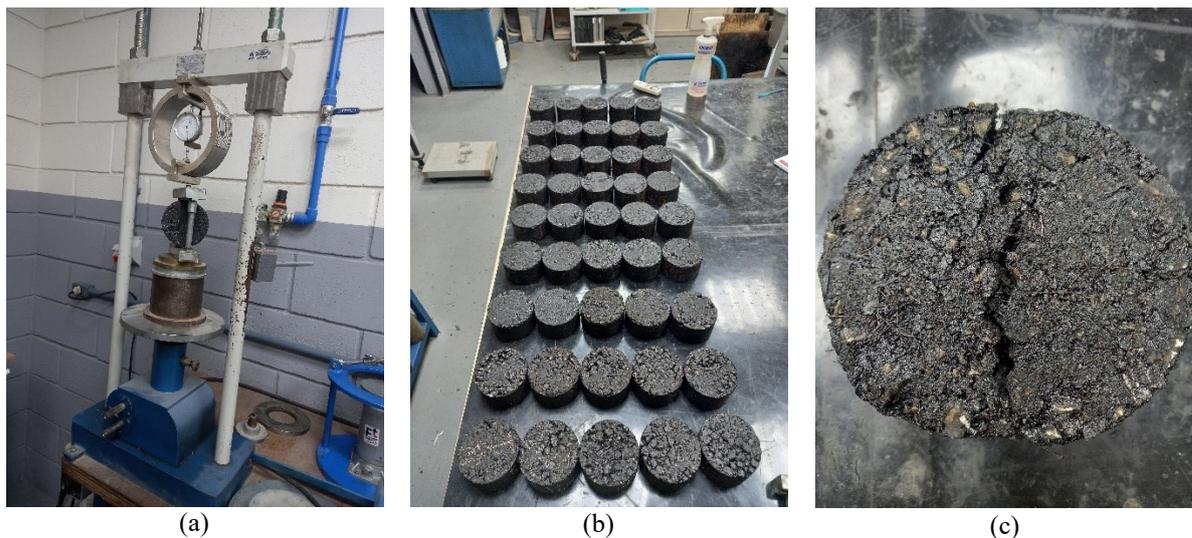
F : carga de ruptura, em kgf;

D : diâmetro do corpo de prova, em cm;

H : altura média do corpo de prova, em cm.

Por fim, os resultados obtidos no ensaio foram registrados em planilha eletrônica, como os dados de identificação dos corpos de prova, os valores da resistência à tração diametral obtidos no momento da ruptura, e as medidas de altura, massa e diâmetro de cada corpo de prova.

Figura 4.16 - Ensaio de tração indireta: (a) equipamento do ensaio de tração indireta, (b) corpos de prova identificados para ensaio, (c) corpo de prova após ruptura.



Fonte: Autora.

4.5.5. Duriez a 18 °C

A norma Europeia AFNOR NF EN 12697-12 (2018) aborda três métodos de teste para determinar o efeito da saturação e condicionamento acelerado da água. O ensaio de Duriez a 18 °C é o método B da referida norma, padronizado para avaliar a resistência à deterioração das misturas asfálticas causada pela água. Esta avaliação é importante faz uma relação direta com o desempenho e durabilidade das misturas durante o tempo de vida do revestimento asfáltico.

O método de avaliação da resistência de misturas asfálticas se baseia na resistência à compressão de amostras cilíndricas (Figura 4.17). A partir de um conjunto de 6 corpos de prova

cilíndricos produzidos para cada teor de ligante (Tabela 4.8), foram selecionados dois subconjuntos de 3 corpos de provas. Enquanto um subconjunto é mantido a 50% de umidade, o outro é saturado e armazenado em água (Figura 4.17d). Após o período de condicionamento, a resistência à compressão de cada subconjunto é determinada a uma temperatura de 18 °C. A relação entre a resistência à compressão do subconjunto condicionado com água e a do subconjunto seco é então expressa em porcentagem.

De acordo com a norma, os corpos de prova devem medir 1000 g de massa, devido a especificação para misturas com diâmetro máximo da curva granulométrica inferior a 14,00 mm. Após o preparo das misturas, as amostras foram compactadas em moldes de aço com diâmetro interno medindo 80,00 mm \pm 0,1 mm, e altura de 190,00 mm, conforme prevê a norma. As amostras são compactadas em uma prensa de duplo pistão (Figura 4.17b), aplicando-se uma carga constante de 60 kN por 5 minutos.

Após desmoldar os corpos de prova, eles foram submetidos a um repouso de 24 horas em temperatura ambiente, a fim de respeitar o tempo de cura da mistura. Após este período, 3 corpos de prova (condicionados) de cada teor foram submetidos a um pré saturação em bomba de vácuo por 2 horas a 350 mmHg e imersas em água a 18 °C por 7 dias. Os outros 3 corpos de prova de cada teor (não condicionados) foram mantidos em ambiente seco a 18 °C por 7 dias.

Após um período de sete dias, os corpos de prova foram submetidos à compressão uniaxial utilizando uma prensa. A resistência à compressão de cada amostra foi medida e utilizada para determinar a relação entre as amostras condicionadas em água (r) e as não condicionadas (R). Para misturas asfálticas do tipo BBSG 0/14 mm produzidas para este estudo, é estabelecido que a relação r/R não pode ser inferior a 0,70, conforme indicado por MANUEL LPC (2007).

Na sequência, encontra-se ilustrado pela Figura 4.17 o processo de compactação dos corpos de prova, saturação e ensaio de compressão.

Figura 4.17 - Sequência do ensaio de Duriez: (a) Amostra no cilindro de compactação, (b) Compactação por duplo pistão, (c) Saturação das amostras, (d) Acondicionamento em água, (e) Compressão uniaxial na prensa, (e) Corpo de prova após o ensaio de compressão uniaxial.



Fonte: Evaldt (2023).

CAPÍTULO 5

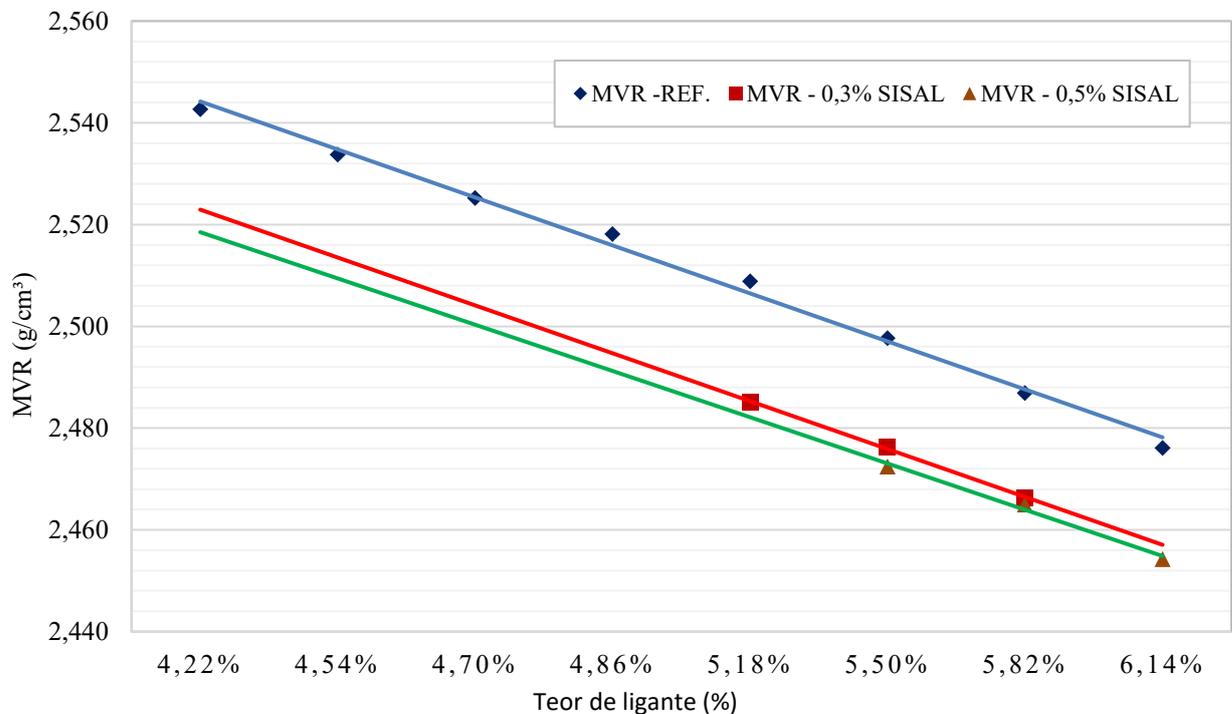
RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo, serão apresentados os resultados e discussões obtidos a partir da pesquisa realizada. Os dados obtidos foram cuidadosamente analisados e interpretados, permitindo a identificação de tendências e padrões relevantes.

5.1. MASSA ESPECÍFICA VOLUMÉTRICA REAL (MVR)

A obtenção da massa específica volumétrica real é importante para garantir a qualidade e trabalhabilidade da mistura asfáltica. Essa medida permite calcular o teor de vazios presente na mistura, uma vez que o excesso de vazios pode comprometer a resistência e a capacidade de suporte da camada asfáltica. Na Figura 5.1 encontra-se o gráfico e a tabela de resultados médios obtidos a partir do ensaio de duas amostras para cada teor de ligante.

Figura 5.1- Resultado do MVR para cada formulação.



Fonte: Autora.

É possível observar na Figura 5.1 que as amostras de referência apresentaram valores de MVR maiores do que as amostras com a incorporação de sisal. Além disso, há uma tendência de diminuir o valor de MVR com o aumento da porcentagem de sisal na formulação. Isso ocorre porque a fibra de sisal gera uma interferência no contato entre granulares, aumentando a quantidade de vazios na amostra. O aumento no teor de vazios relaciona-se diretamente com o aumento no volume da amostra e redução da massa específica volumétrica real (MVR).

As fibras de sisal apresentam fios longos que se juntam em uma trama emaranhada, e, conforme observado no ensaio de microscopia eletrônica de varredura (MEV) (Figura 4.3), o efeito da trama de sisal cria intervalos espaciais agregando volume no material. Dessa forma, observa-se também que, quanto maior o teor de fibra na mistura, maior o efeito da trama de sisal entre os agregados, e conseqüentemente, menor o MVR. Esta mesma tendência foi observada em trabalho realizado por Fronza (2022), que ao estudar a incorporação de resíduos de construção civil (RCD) em misturas asfálticas, os valores de MVR diminuíram progressivamente com o aumento no teor de RCD.

5.2. ENSAIO MARSHALL

O método Marshall foi utilizado para a verificação do teor de serviço de ligante e avaliação das propriedades mecânicas das misturas asfálticas. A partir dos resultados obtidos, foi possível verificar se as formulações propostas atendem tecnicamente as especificações de serviço para o projeto de misturas asfálticas destinadas à camada de rolamento da NORMA DNIT-ES 031 (2006). A Tabela 5.1 apresenta os parâmetros indicados na referida norma.

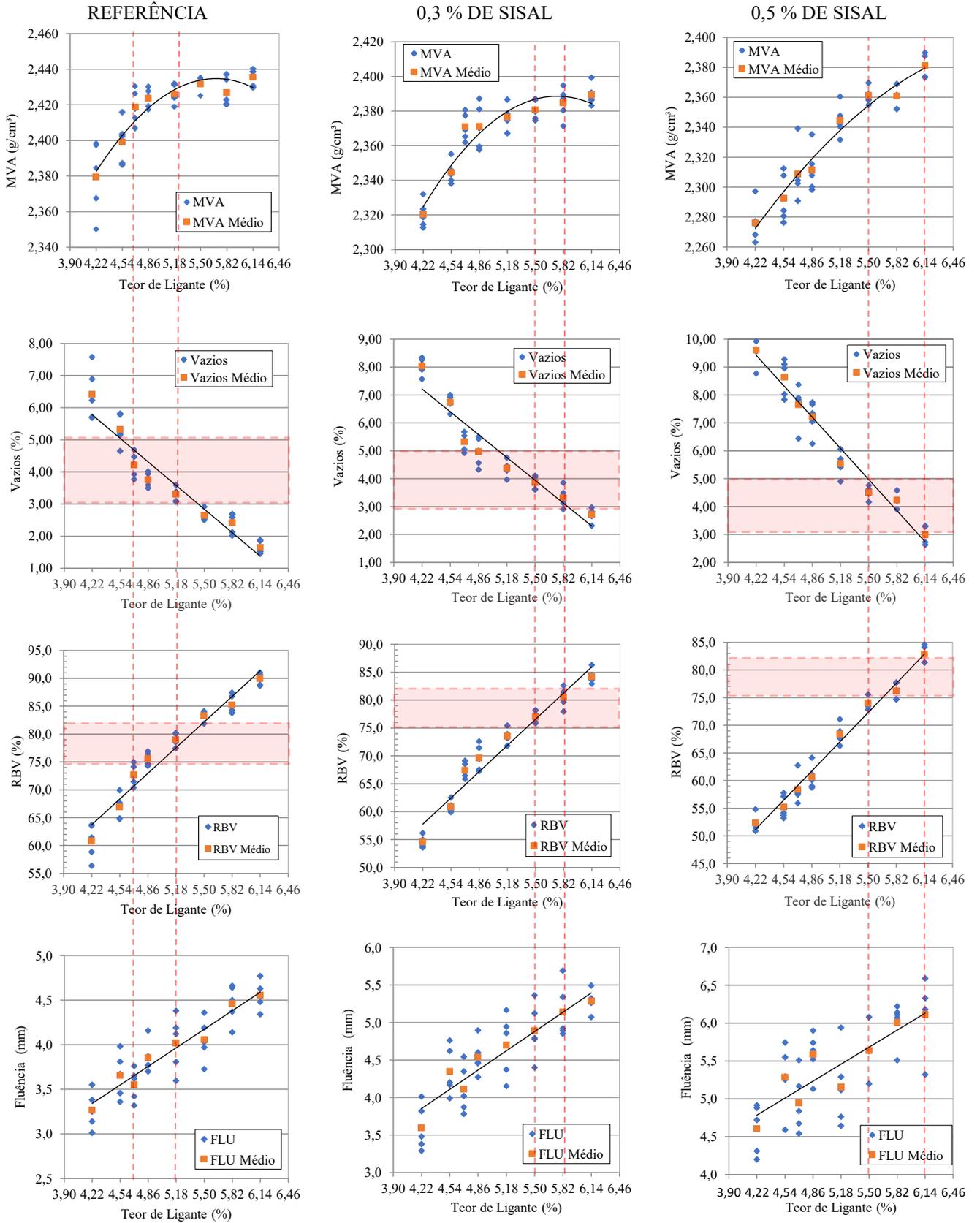
Tabela 5.1 Valores limites para os parâmetros de dosagem.

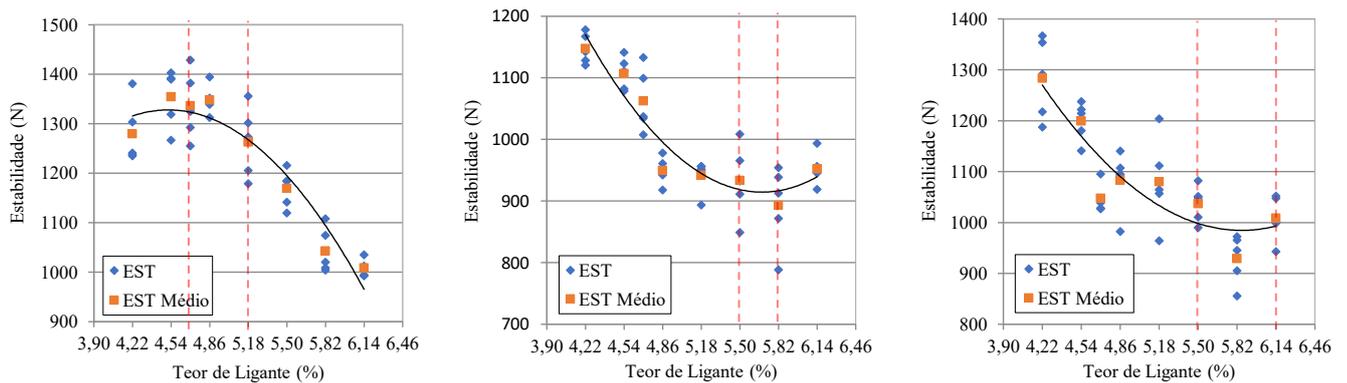
Características	Método de ensaio	Camada de rolamento
Porcentagem de vazios, %	DNER-ME 043	3 a 5
Relação betume/vazios	DNER-ME 043	75 – 82
Estabilidade mínima, (Kgf) (75 golpes)	DNER-ME 043	500
Resistência à tração por compressão diametral estática a 25 °C, mínima, MPa	DNER-ME 138	0,65

Fonte: DNIT-ES 031(2006).

A análise dos parâmetros obtidos em todos os teores foi realizada com o objetivo de encontrar o teor de serviço de ligante betuminoso, utilizando as formulações de mistura propostas neste trabalho. Os resultados do ensaio Marshall para todas as formulações de mistura estão apresentados na Figura 5.2.

Figura 5.2 - Resultados do ensaio Marshall.





Fonte: Autora.

O resultado da massa específica aparente (MEA) corrobora com o resultado encontrado no ensaio MVR (Figura 5.1), onde os valores obtidos são maiores para as formulações de referência, e menores conforme aumenta-se o percentual de sisal na mistura. Essas condições se devem ao maior contato entre partículas na mistura de referência em relação as formulações contendo fibras de sisal, onde elas se alocam nos interstícios dos grãos, afastando o contato entre os mesmos e aumentando a volumetria da mistura.

Em relação ao volume de vazios, observa-se uma tendência oposta ao que ocorre no MVR. Enquanto a massa específica volumétrica real das amostras de referência são as maiores em comparação com as formulações contendo sisal, elas apresentam os menores teores de vazio. Isso ocorre porque nas misturas de referência, o contato é apenas entre os grãos dos granulares pétreos, sem a formação da trama de sisal dentro da estrutura do material. Por outro lado, as amostras contendo sisal apresentam uma tendência de crescimento progressivo do percentual de vazios conforme aumenta o percentual de fibras na mistura, pois quanto maior o efeito da trama de sisal, menor a densificação do material.

Quanto a relação betume/vazios (RBV), as misturas de referência apresentam maior linearidade entre os valores, da mesma forma que atingem os maiores valores de RBV. Este resultado se deve ao fato de a formulação de referência apresentar maior contato entre os grãos e pouco espaços vazios a serem ocupados pelo ligante betuminoso, ou seja, rapidamente as amostras atingem a saturação de ligante. Já nas formulações contendo sisal, formam-se mais vazios, e o ligante é absorvido em uma maior quantidade pela fibra na hora da mistura. Sendo assim, menos ligante é alojado nos vazios da amostra, o que aumenta sua necessidade nas formulações para estabelecer uma relação betume/vazios de crescimento linear. De forma geral, quanto maior a quantidade de fibra, maior deverá ser o teor de ligante betuminoso para chegar em uma relação betume/vazios similar as obtidas nas amostras de referência.

É possível observar nos resultados de fluência, maiores valores nas amostras com 0,5 % de sisal em relação as amostras com 0,3 %, e os menores valores foram alcançados nas amostras de referência. Em suma, a fluência é a deformação que o material sofre até o momento da ruptura do corpo de prova na prensa. Sendo assim, em conformidade com os resultados discutidos anteriormente, observa-se que quanto maior o teor de fibra, maior será o volume de vazios, a fibra interfere diretamente no contato entre as partículas de granulares, e conseqüentemente, a resistência mecânica do material sofre um decréscimo quando ele se encontra submetido a carregamento.

A estabilidade é uma medida de resistência à ruptura do material quando está sendo realizado o teste de compressão na prensa Marshall. Dessa forma, a estabilidade mensura a carga máxima na ruptura e a fluência, que é o deslocamento até que esta ruptura aconteça. Observa-se nas amostras de referência um gráfico côncavo, que é o resultado esperado na metodologia Marshall, onde o aumento progressivo no teor de ligante acarreta uma saturação progressiva dos vazios. Adicionalmente, a saturação aumenta até o pico do gráfico, onde encontra-se o ponto ótimo em que a película de ligante que envolve o granular confere a máxima resistência mecânica ao corpo de prova. A partir deste ponto, ocorre um efeito lubrificador no contato entre as partículas, gerando uma perda de resistência ao cisalhamento no contato entre os granulares, e conseqüentemente, uma perda de resistência à compressão simples na prensa Marshall.

Nas amostras com fibra de sisal, o gráfico de estabilidade se comporta de maneira inversa, ou seja, a curva resulta num comportamento convexo. Este efeito ocorre em função de duas condições observadas nas amostras: a primeira é a perda do intertravamento entre as partículas de granulares pela interferência da fibra de sisal, e a segunda é que efeito do aumento nos vazios diminui a resistência mecânica da mistura conforme já abordado. Porém, a partir dos teores de 5,82 %, a amostra se encontra com um alto teor de ligante betuminoso, gerando uma reação do efeito de poropressão e um falso aumento na resistência mecânica pelo excesso de ligante no material.

Por fim, analisando todos os resultados e os intervalos de parâmetros conforme as recomendações da Tabela 5.1, tem-se a Tabela 5.2 com os teores de serviço obtidos com a metodologia Marshall.

Tabela 5.2 - Teores potenciais de serviço obtidos com a metodologia Marshall.

Formulação	Teores de serviço
Referência	4,70 % - 5,18 %
0,3 % de sisal	5,50 % - 5,82 %
0,5 % de sisal	5,50 % - 6,14 %

Fonte: Autora.

Tais teores definidos com a metodologia são uma faixa de valores potenciais de aproveitamento como teores de serviço, porém, para definir qual teor escolher para cada formulação, a metodologia Marshall não é suficiente para dar a análise definitiva, ficando a critério do projetista. Dado o exposto, foram realizados os ensaios de tração indireta por compressão diametral e Duriez à 18 °C para completar a análise do comportamento do material e estabelecer um critério de escolha dentre os teores obtidos.

5.3. RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL

Observa-se na Figura 5.3 que os maiores valores de resistência mecânica foram obtidos nas amostras de referência. Isso ocorre justamente pela mistura asfáltica não conter a interferência de fibras de sisal nos interstícios da mistura, ocorrendo um intertravamento mais efetivo entre partículas. De forma geral, conforme ilustrado anteriormente, o sisal interfere no contato entre os granulares, diminuindo o intertravamento entre partículas, e conseqüentemente, a resistência mecânica da mistura. A Tabela 5.3 ilustra os resultados.

Tabela 5.3 - Resultados médios da tração indireta.

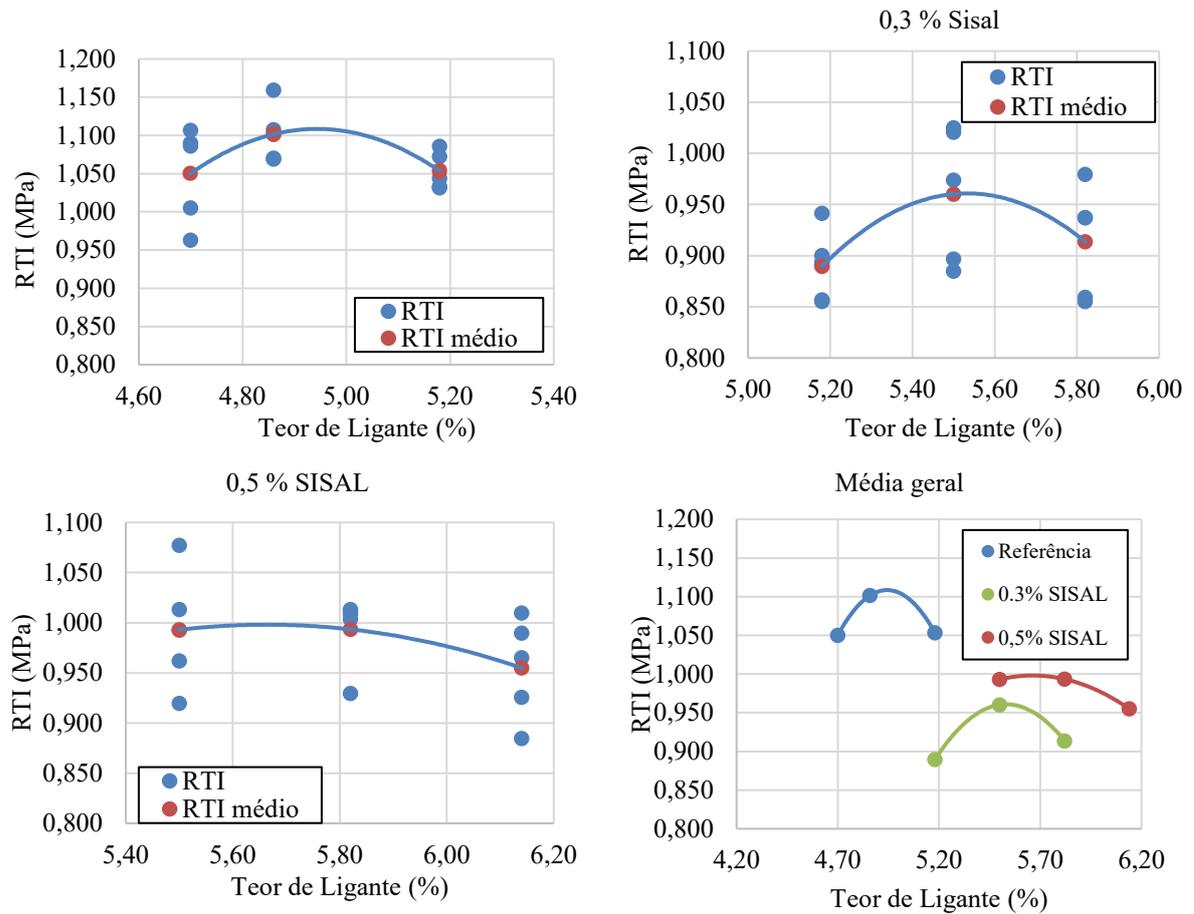
	4,70 %	4,86 %	5,18 %	5,50 %	5,82 %	6,14 %
Referência	1,050	1,102	1,053	-	-	-
0,3 % sisal	-	-	0,890	0,960	0,914	-
0,5 % sisal	-	-	-	0,993	0,993	0,955

Fonte: Autora.

Entre as amostras contendo fibra de sisal, observa-se que ao aumentar o teor de sisal na formulação de 0,3 % para 0,5 %, há um pequeno acréscimo na resistência mecânica da mistura. O efeito da maior densidade de fibras adicionadas diminuiu sensivelmente a propagação de trincas geradas pelo esforço de tração indireta. Como não houve aumento de resistência mecânica entre as amostras de teores de 0,3 % e 0,5 %, de fibra de sisal e as amostras de referência, não é possível garantir que a fibra seja responsável pelo acréscimo de resistência

mecânica. Porém, o sensível aumento no pico de resistência com o aumento do teor de fibra adicionada na formulação, é observado pois ela atua inibindo a propagação de trincamento no corpo de prova.

Figura 5.3 - Resultados médios do ensaio de tração indireta.



Fonte: Autora.

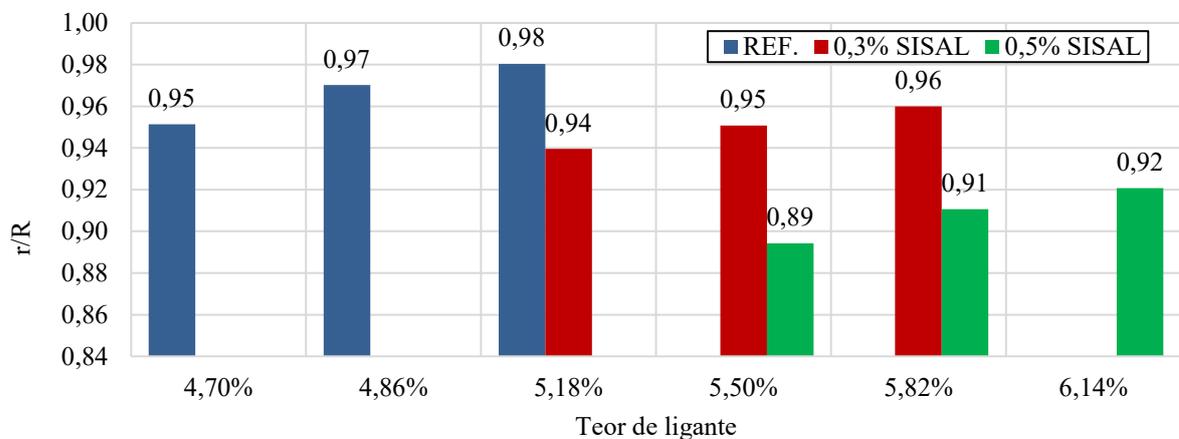
Com os resultados de tração indireta, em relação as faixas de valores indicadas no ensaio Marshall, observa-se na mistura de referência que o teor de 4,86 % atende os parâmetros estipulados na Tabela 5.1 e apresenta o resultado mais satisfatório. Da mesma forma, para as amostras com 0,3 % de sisal, o teor de 5,50 % é indicado pelo gráfico de tração indireta como o teor mais indicado de trabalho. Por fim, para as amostras com a formulação de 0,5 % de sisal, o resultado mais satisfatório foi obtido utilizando o teor de 5,82 % de ligante betuminoso.

5.4. DURIEZ A 18 °C

O ensaio de Duriez analisa como a mistura asfáltica resiste à ação deletéria da água. Se houver qualquer tipo de imperfeição superficial, como vazios ou trincamento no ligante, a água é capaz de penetrar no espaço onde a falha ocorre, entrando em contato com a mistura asfáltica. A água apresenta uma tensão molecular elevada, que é superior tanto à tensão do ligante quanto à tensão interfacial entre o ligante e as partículas granulares. Por essa razão, ela é capaz de retirar a película de ligante que reveste as partículas granulares, reduzindo, assim, a resistência mecânica da mistura asfáltica.

Para a realização do ensaio de Duriez a 18 °C, foram escolhidos os mesmos teores de ligante betuminoso utilizado no ensaio de Tração Indireta, a Figura 5.2 apresenta os resultados obtidos. De acordo com a norma francesa AFNOR NF 98-251-1 (2002), é estabelecido que a relação entre a resistência dos corpos de prova condicionados em água a 18 °C durante sete dias (r) e a resistência dos corpos de prova condicionados a seco (R) deve ser maior que 0,70.

Figura 5.4 – Relação da resistência condicionada (r) e não condicionada (R).



Fonte: Autora.

Todas as amostras apresentam valores crescentes, demonstrando que quanto maior o teor de ligante, menor a quantidade de vazios presentes na mistura, e menores são os caminhos de entrada da água nos interstícios da mistura asfáltica. O tipo de mistura asfáltica em estudo, por ser uma mistura densa, não possui vazios comunicantes, ou seja, as moléculas de água que penetram na amostra, permanecem nos espaços vazios maximizando o efeito nocivo da água ao tentar destruir a ligação do ligante com as partículas de granulares. De forma geral, quanto

maior o teor de vazios, maiores os pontos de penetração da água, diminuindo progressivamente a resistência à ação da água.

É possível observar que as amostras contendo sisal apresentaram resultados inferiores em relação às amostras de referência, que não possuem a incorporação de sisal. Além disso, verificou-se que, ao aumentar a quantidade de sisal, as misturas tornam-se mais susceptíveis à ação deletéria da água. Conforme mencionado anteriormente, a incorporação das fibras de sisal na mistura asfáltica aumenta a quantidade de vazios, permitindo que a água penetre mais facilmente na amostra. Além disso, a trama das fibras de sisal absorve o ligante betuminoso, diminuindo a espessura da película que envolve os granulares, e como resultado, ocorre uma redução na resistência mecânica. À medida que se aumenta a quantidade de sisal na mistura, sua interferência direta no contato entre os granulares torna-se mais prejudicial à resistência à compressão simples dos corpos de prova.

Analisando as faixas de trabalho estipuladas no ensaio Marshall, nas amostras de referência, tem-se que a dosagem de 4,86 % além de ter um resultado satisfatório na tração indireta, atende ao resultado pretendido para o ensaio de Duriez, ou seja, a relação r/R acima de 0,70. Nas formulações com 0,3 % de sisal, observa-se que o teor de 5,5 % de ligante betuminoso atende satisfatoriamente aos parâmetros do ensaio Marshall exigidos normativamente e apresenta uma relação r/R acima de 0,70. Por fim, as formulações contendo 0,5 % de sisal resultaram nos melhores resultados para um teor de trabalho de ligante betuminoso de 5,82 %, atendendo ao mesmo tempo os parâmetros exigidos no ensaio Marshall e apresentando resultados satisfatórios no ensaio de Duriez.

CAPÍTULO 6

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Ao longo deste trabalho, foi possível analisar comparativamente a incorporação de fibra de sisal em misturas asfálticas do tipo *Béton Bitumineux Semi Grenus* (BBSG), para tanto, foram testados oito teores de ligante: 4,22 %, 4,54 %, 4,70 %, 4,86 %, 5,18 %, 5,50 %, 5,82 % e 6,14 %. Cumprindo o objetivo inicial do trabalho, as amostras contendo a fibra de sisal foram comparadas em relação a amostras de misturas asfálticas de referência, ou seja, sem a incorporação da fibra, constituídas apenas por frações granulares oriundas de rocha gnáissica.

A análise laboratorial da fibra de sisal permitiu classificá-la como um Resíduo Não Perigoso, pertencente à Classe II B de resíduos inertes. Além disso, a análise de MEV revelou que as fibras são compostas por fios longos com microfibrilas orientadas longitudinalmente, que se entrelaçam formando uma trama emaranhada e criando vazios, o que confere volume ao material. Essa característica foi confirmada pelos resultados de massa específica volumétrica real (MVR), onde os maiores valores foram obtidos nas amostras de referência, sem a incorporação da fibra de sisal. Em paralelo, o volume de vazios mostrou um aumento considerável e progressivo com a adição de fibra de sisal. Quanto maior o teor de fibra adicionado na mistura, maior o volume de vazios e maior a interferência da trama de sisal no contato entre os granulares, o que diminuiu a resistência mecânica do material.

Em relação ao consumo de ligante betuminoso, a adição de fibras de sisal resultou em um aumento no consumo pelas misturas asfálticas analisadas. Esse efeito se deve à textura superficial escamosa das paredes celulares das fibras, que tendem a absorver parte do ligante incorporado à mistura. Essa absorção reduz a espessura de ligante betuminoso que envolve os agregados pétreos, diminuindo a resistência mecânica à compressão diametral e a resistência à ação deletéria da água, como observado nos resultados de Tração Indireta (RTI) e Duriez, respectivamente.

É importante destacar que, durante os estudos realizados, foi constatada uma melhora na capacidade de reduzir a propagação de trincas e fissuras no ensaio de Tração Indireta (RTI) com o aumento do teor de fibra de sisal incorporada, de 0,3 % para 0,5 %. Ademais, observou-se um aumento significativo no pico de resistência. Esses resultados, juntamente com os obtidos no ensaio de Duriez, foram decisivos na escolha do teor de ligante betuminoso de trabalho, uma vez que o ensaio Marshall não proporciona uma avaliação precisa dos parâmetros necessários.

Conclui-se que os resultados desta pesquisa indicam a inviabilidade técnica da adição de fibras de sisal em misturas asfálticas densas, uma vez que essa prática não apresenta benefícios significativos em relação às propriedades mecânicas e durabilidade do revestimento asfáltico. Além disso, essa adição requer um maior consumo de ligante betuminoso, o que acarreta um impacto econômico maior. No entanto, aprimoramentos nos estudos nessa área podem trazer importantes avanços para o setor de pavimentação, proporcionando soluções mais sustentáveis e duráveis para o transporte rodoviário.

Por último, é importante salientar que os ensaios realizados na metodologia Marshall, Tração Indireta e Duriez não medem o desempenho mecânico do material em condições de campo, ou seja, sob solicitação de cargas dinâmicas variando temperatura e frequência. Portanto, recomenda-se, para trabalhos futuros, uma análise dessas formulações de misturas asfálticas de acordo com as solicitações reais de campo, utilizando a metodologia francesa para formulação de misturas asfálticas como sugestão. Isso pode proporcionar uma compreensão mais precisa e realista do desempenho dessas misturas asfálticas.

REFERÊNCIAS

- ABTAHI S. M., SHEIKHZADEH M., HEJAZI S. M. Fiber-reinforced asphalt-concrete – A review. *Construction and building materials*, V. 24, p. 871-877, 2010. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2009.11.009.
- ADALGARI S., AL-ASSI M., KASSEM E., CHOWDHURY A., MASAD E. Development of predictive models for skid resistance of asphalt pavements and seal coat. *International Journal of Pavement Engineering*. V. 23, p. 695-707, 2020. <https://doi.org/10.1080/10298436.2020.1766685>
- ALVES M. O.; SANTIAGO E. G.; LIMA A. R. M. Diagnóstico socioeconômico do setor sisaleiro do nordeste brasileiro. v. 04. Fortaleza: Banco do Nordeste do Brasil, 2005.
- American Chemical Society (ACS), 2014. What is the Greenhouse Effect? Disponível em: <https://www.acs.org/climatescience/climatesciencenarratives/what-is-the-greenhouse-effect.html>. Acesso em: 13 fev. 2023.
- ANDRADE, V. D. Influência da formulação de esqueletos minerais na deformação permanente de misturas de concreto asfáltico densas. 2018. Dissertação. (Programa de pós-graduação em engenharia e ciências mecânicas) – Centro Tecnológico de Joinville, Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville. 2018.
- ASPHALT INSTITUTE. Mix design methods for asphalt concrete and other hot-mix types: manual series no. 2 (MS-2). Maryland: Asphalt Institute, 1988.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 10004: Resíduos sólidos - Classificação. 2 ed. Rio de Janeiro (Rj), 2004. 77 p
- ASSOCIATION FRANÇAISE DE NORMALISATION. AFNOR NF P 98-130 a 141: Essais Relatifs aux Chaussées - Préparation des Mélanges Hydrocarbonés. Etude de la conformité d'un enrobé. Paris La Défense Cedex: AFNOR, 1993.
- ASSOCIATION FRANÇAISE DE NORMALISATION. AFNOR NF EN 12697-12. Méthodes d'essai - Partie 12: Détermination de la sensibilité à l'eau des éprouvettes bitumineuses. Paris, França, 2018.
- ASSOCIATION FRANÇAISE DE NORMALISATION. AFNOR NF EN 12697-5. Mélanges bitumineux: Méthodes d'essai por mélange hydrocarboné à chaud. Partie 5: Masse volumique maximale (masse volumique réelle) des matériaux bitumineux, 2019
- ARAÚJO, M. de F. A. de S.; LINS, V. de F. C.; PASA, V. M. D.; LEITE, L. F. M. (2013), Weathering aging of modified asphalt binders. *Fuel Processing Technology*, Vol. 115, pp. 19-25, ISSN 0378-3820. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2013.03.029>.
- BAI X., WANG L., 2023. “Study on mesoscopic model of low-temperature cracking of steel slag asphalt mixture based on random aggregate”, *Construction and building materials*, v.364. China, 2023 artigo 129974. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129974>.

BARRETO JÚNIOR, L. Q.; MORAES, L. A. B. DE; A. DOS S. SERRA; FÉLIX, R. DA S. Avaliação do Comportamento do Ligante Asfalto-Borracha e de Fibras Naturais em Misturas Asfálticas Descontínuas. 2006. Revista UNIFACS, Vol. 10 (1), disponível em <https://revistas.unifacs.br/index.php/sepa/article/view/36>. Acesso em: 05 fev. 2022.

BARRA, B. S. Avaliação da ação da água no módulo complexo e na fadiga de misturas asfálticas densas. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2009.

BARRA, B. S. Avaliação do desempenho mecânico de misturas asfálticas utilizando materiais do estado do Pará com o emprego de pó calcário. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) -Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2005.

BARRA, B.S., MOMM, L., BROSSEAUD, Y., *et al.*, Diretrizes para a Formulação e Avaliação do Comportamento Mecânico de Misturas Asfálticas. Revista Pavimentação, v. 17, p. 38-58, 2010.

BASSYOUNI, M. (2018), Dynamic mechanical properties and characterization of chemically treated sisal fiber-reinforced polypropylene biocomposites. Journal of Reinforced Plastic and Composites, Vol. 37, Issue 23, pp. 1402–1417. DOI: <https://doi.org/10.1177/0731684418798049>

BERNUCCI, B. L.; MOTTA, L. M. G.; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B. Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros. 2. ed. Rio de Janeiro: Petrobrás: ABEDA, 2022. 750 pg. ISBN: 978-85-69658-02-3.

BRASIL. Ministério da Infraestrutura. Empresa de Planejamento e Logística. Plano Nacional de Logística 2035, 2021. Disponível em: https://ontl.epl.gov.br/wp-content/uploads/2021/10/PNL_2035_29-10-21.pdf. Acesso em: 26 nov. 2021.

BRASIL. K. A. GT 2 gargalos das culturas do sisal, malva, piaçava, coco, seda e bambu: breve panorama para orientar uma proposta de governança. Belo Horizonte: Slide, 2019. Slides. Disponível em: <http://www.agricultura.gov.br/assuntos/camaras-62>. Acesso em: 15 maio 2022.

BUCHHOLZ, B. Avaliação comparativa do impacto da variação de curvas granulométricas no nível de absorção sonora de misturas asfálticas drenantes, muito delgadas e densas. 2020. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil de Infraestrutura) – Centro Tecnológico de Joinville, Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2020.

BUTTON, J. W.; PERDOMO, D.; LYTTON, R. L., (1990), Influence of Aggregate on Rutting in Asphalt Concrete Pavements. Transportation Research Record (TRR), n. 1259 (USA), pp. 141-152.

CADORIN, N. D.; MELO, J. V. S. DE; BROERING, W. B.; MANFRO, A. L.; BARRA, B. S. (2021), Asphalt nanocomposite with titanium dioxide: Mechanical, rheological and photoactivity performance. Construction and Building Materials, Vol. 289, 123178, ISSN 0950-0618. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123178>.

CRUZ G. K. A., MELO NETO A. S., ARRUDA S. M., LUCENA L. C. F. L., ZIEGLER C. R., SILVA G. C. B. Influence of particle size selection methods on asphalt mixtures produced with lateritic aggregates. Construction and building materials, V. 314, part B, article. 125201, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125201>.

CARVALHO, A. J. C. Estudo da utilização de fibras em misturas betuminosas. 2012. Tese (Mestrado em Engenharia Civil) – Departamental de Engenharia Civil, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Lisboa, 2012.

CARVALHO, A. D.; BERNUCCI, L. L. B. Avaliação laboratorial do comportamento à deformação permanente em misturas asfálticas empregadas no estado do Pará. 2000. Revista Traços, v. 3, nº 5 p. 55-66.

CANEVAROLO JR, S. V. Ciência dos Polímeros – Um texto básico para tecnólogos e engenheiros. 2ª edição., São Paulo: Artliber, 2002.

CLARA, E. Avaliação de misturas asfálticas densas com a incorporação de cinza de carvão mineral. Dissertação (Mestrado em Ciências Mecânicas) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciências Mecânicas, Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2020.

CONAB/SISAL SUL, Sisal Brasil. Informativo Dezembro 2021. 2021. Disponível em https://www.cosibra.com.br/blog_ver.php?id=14. Acesso em: 20 maio. 2022.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE. Anuário Estatístico 2021. 2021. Disponível em <https://anuariodotransporte.cnt.org.br/2021/>. Acesso em: 05 fev. 2022.

DEFOIRDT, N., BISWAS, S., VRIESE, L., TRAN, L. Q. N., ACKER, J. V., AHSAN, Q., GORBATIKH, L. VUURE, A. V., VERPOEST, I., 2010, “Assessment of the Tensile Properties of Coir, Bamboo and Jute Fibre”, Composites: Part A, v. 41, pp. 588–595.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM (DNER). DNER - ME 054/97. Equivalente de Areia. Instituto de Pesquisas Rodoviárias (IPR), Rio de Janeiro, RJ. 1997, 10 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM (DNER). DNER - ME 081/98. DNER ME 81-1998 - Determinação Da Absorção e Da Densidade de Agregado Graúdo. Instituto de Pesquisas Rodoviárias (IPR), Rio de Janeiro, RJ. 1998, 6 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM (DNER). DNER - ME 266/97. Agregados – Determinação do teor de materiais pulverulentos. Instituto de Pesquisas Rodoviárias (IPR), Rio de Janeiro, RJ. 1997, 10 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT). DNIT ES 031/2006a: Pavimentos flexíveis – Concreto asfáltico – Especificação de serviços. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Instituto de Pesquisas Rodoviárias (IPR), Rio de Janeiro, RJ. 2006a, 14 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT). DNIT ME 136/2018. Pavimentação asfáltica – Misturas asfálticas –. Determinação da resistência à tração por compressão diametral – Método de ensaio. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Instituto de Pesquisas Rodoviárias (IPR), Rio de Janeiro, RJ. 2018, 9p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT). DNIT-ME 427/2020. Pavimentação – Misturas asfálticas – Determinação da densidade relativa máxima medida e da massa específica máxima medida em amostras não compactadas. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT). Manual de Pavimentação. 3. ed. Rio de Janeiro. Publicação Instituto de Pesquisas Rodoviárias (IPR) - 719.2006b.

DHADIWAL A. J., RAJAK T. K. Near surface mounting technology with glass fibre reinforced polymer and sisal rope fibre for flexural strengthening of reinforced concrete beams. *Materials Today: Proceedings*, dez. 2022. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.11.207>.

DIAS, A. T. (2009), Valorização dos resíduos de sisal: uma proposta para a região do semiárido do Estado da Bahia. Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Estadual de Feira de Santana, 104 p. Bahia, BA.

DOMINGUES, F. A. A. MID - Manual para identificação de defeitos de revestimentos asfálticos de pavimentos. 1993. Ed. Felipe Augusto Aranha Domingues, São Paulo.

DUMKE, M. P. Concreto asfáltico drenante com fibras de celulose, ligante modificado por polímero e asfalto-borracha. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005.

EMBRAPA. Cadeia produtiva do sisal no nordeste brasileiro. Embrapa Algodão, 2ª ed. 2014. ISSN 1678-8710. Disponível em: https://www.spo.cnptia.embrapa.br/conteudo?p_p_id=conteudoportlet_WAR_sistemasdeproducao6_1galceportlet&p_p_lifecycle=0&p_p_state=normal&p_p_mode=view&p_p_col_id=column-2&p_p_col_count=1&p_r_p_-76293187_sistemaProducaoId=3716&p_r_p_-996514994_topicoId=3255. Acesso em: 13 fev. 2023.

EMBRAPA. Teores de Hemicelulose, Celulose e Lignina em plantas de cobertura com potencial para sistema plantio direto no Cerrado. *Boletim Pesquisa e Desenvolvimento* 290, ISSN 1676-918X, Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. 2010. Disponível em <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/75878/1/bolpd-290.pdf>. Acesso em: 05 fev. 2022.

Environmental Protection Agency (EPA), 2022. Overview of Greenhouse Gases. Disponível em: <https://www.epa.gov/ghgemissions/overview-greenhouse-gases>. Acesso em: 13 fev. 2023.

EVALDT F. P. Avaliação do comportamento funcional de misturas asfálticas densas do tipo BBSG com a incorporação de fibra de sisal. 2023. Dissertação de Mestrado (Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciências Mecânicas) – Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2022.

FARIA, M. M. de; JAEGER, S. M. P. L., OLIVEIRA, G. J. C. de; OLIVEIRA, R. L.; LEDO, C. A. DA S.; SANTANA, F. S. de (2008), Composição bromatológica do co-produto do desfibramento do sisal tratado com uréia. *Revista Brasileira de Zootecnia*, Vol. 37, nº 3, pp. 377-382, ISSN impresso: 1516-3598, ISSN on-line: 1806-9290

FENGEL D.; WEGENER, G. *Wood: chemistry ultrastructure reactions*. Berlin: Walter de Gruyter, Inc, 1989. 613 p.

FERREIRA, S.R.; LIMA, P.R.L.; SILVA, F.A.; TOLEDO FILHO, R.D. Influência de ciclos molhagem-secagem em fibras de sisal sobre a aderência com matrizes de cimento Portland. Rio de Janeiro: *Revista Matéria*, v. 17, n. 2, pp. 1024 – 1034, 2012.

FRONZA, R. C. Avaliação comparativa dos parâmetros de dosagem de misturas asfálticas densas com a incorporação de resíduo de construção e demolição. 2022. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em engenharia civil de infraestrutura) –Departamento de Engenharias da Mobilidade, Centro Tecnológico de Joinville, Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2022.

FROSSARD R. M. Influência da adesividade ligante-agregado nas propriedades de fratura de misturas asfálticas sujeitas ao dano por umidade. 2021. Dissertação (Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2021.

FUNK J. E.; DINGER D. R. Caol grinding and particle size distribution studies for coal-water slurries at high solids content. Empire State Electric Energy Research Corporation, New York, 1980.

FAO. FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. Unlocking the commercial potential of Natural Fibres. Roma: 2012. Disponível em: <https://www.fao.org/natural-fibres-2009/resources/en/>. Acesso em: 23 maio 2022.

GENTRY H. S. Agaves of continental North America. Arizona: University of Arizona Press, 1982. ISBN: 0816507759.

GUTIÉRREZ, A.; RODRÍGUEZ, I. M.; RÍO, J. C. del (2008), Chemical composition of lipophilic extractives from sisal (*Agave sisalana*) fibers. *Industrial Crops and Products*, Vol. 28, Issue 1, pp. 81-87, ISSN 0926-6690. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2008.01.008>.

GUYER J. P.; P.E., R.A, An introduction to dense graded hot mix asphalt pavement. Califórnia: The Clubhouse Press, 2021. ISBN-13: 979-8650056294

GÓES, M. de S. (2006), Ferritas Mg1- Zn Fe2O4 obtidas por síntese de reação de combustão: caracterização estrutural e nanoestrutural. Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de Materiais (POSMAT) da Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho (UNESP), 79 p. Araraquara, SP

HERTWICH E. G. Increased carbon footprint of materials production driven by rise in investments. *Nature Geoscience*, v. 14, p. 151 – 155, fev 2021. <https://doi.org/10.1038/s41561-021-00690-8>

INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA. Texto para discussão: Estimativa do valor da vida estatística e do valor da economia de tempo em viagens nas rodovias brasileiras com a utilização de pesquisa de preferência declarada. Rio de Janeiro: Ipea, 2019. ISSN 1415-4765. Disponível em <https://repositorio.ipea.gov.br/handle/11058/9589>. Acesso em: 21 jan. 2023.

JESUS, F. L. T. de (2018), Estudo comparativo do tratamento alcalino da fibra de sisal com diferentes reagentes químicos. Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, curso de Engenharia de Materiais, 67 p. Belo Horizonte, MG.

JOHN, M. J.; THOMAS, S. Biofibres and biocomposites. *Carbohydrate Polymers*, v. 71, p. 343-364, fev. 2008.

KAR D.; GIRI J. P., PANDA M. Performance Evaluation of Bituminous Paving Mixes Containing Sisal Fiber as an Additive. *Transportation Infrastructure Geotechnology*, v. 6, p. 189-206, maio 2019. <https://doi.org/10.1007/s40515-019-00079-6>

KIKUKAWA, N.; TAKEMORI, M. NAGANO, Y.; SUGASAWA, M.; KOBAYASHI, S. (2004), Synthesis and magnetic properties of nanostructured spinel ferrites using a glycine-nitrate process. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Vol. 284, pp. 206-214. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2004.06.039>.

KIM J., NEWCOMB D. E. Permanent Deformation in Asphalt Concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*. P. 112-128, fev. 1993. Texas. DOI:10.1061/(ASCE)0899-1561(1993)5:1(112).

LEITE, L. M. F. *et al.* Informações básicas sobre materiais asfálticos: A importância das características dos agregados no desempenho das misturas asfálticas. Rio de Janeiro: IBP, 2021. 196 pg. Disponível em: <https://www.ibp.org.br/personalizado/uploads/2021/05/2021-ebook-ibp-informacoes-basicas-sobre-materiais-asfalticos.pdf>. Acesso em: 09 mar. 2022.

LEITE, L. F. M.; MENEZES, S. M. C. Efeito da composição química dos ligantes na resistência ao descolamento de misturas asfálticas. In: XVII CONGRESSO NACIONAL DE PESQUISA EM TRANSPORTE DA ANPET, 17., 2003, [S.L.]. Anais do Congresso. [S.L.]: Anpet, 2003. p. 1-18. CD-ROM.

LI J., YANG L., HE L., GUO R., LI X., CHEN Y., MUHAMMAD Y., LIU Y. Research progresses of fibers in asphalt and cement materials: A review. *Journal of Road Engineering*, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.jreng.2022.09.002>.

LONDERO C.; LENZ L. A.; Í. M. R. DOS SANTOS, KLEIN N. S. Determinação da densidade de empacotamento de sistemas granulares compostos a partir da areia normal do IPT: comparação entre modelos de otimização de distribuição granulométrica e composições aleatórias. *Cerâmica*. v. 63, p. 22-33, mar. 2017. <https://doi.org/10.1590/0366-69132017633652018>. Acesso em: 27 dez 2022.

MASHAAN N.; KARIM M.; KHODARY F.; SABOO N.; MILAD A. Bituminous Pavement Reinforcement with Fiber: A Review. *CivilEng*. v. 2, p. 599-611, jul. 2021. <https://doi.org/10.3390/civileng2030033>

MARTIN, A. R.; MARTINS, M. A.; MATTOSO, L. H. C.; SILVA, O. R. R. F. 2009. Caracterização química e estrutural de fibra de sisal da variedade Agave Sisalana. *Polímeros: Ciência e Tecnologia*, v. 19, n. 1, p. 40-46, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0104-14282009000100011>.

MANUEL LPC. Manuel LPC d'aide à la formulation des enrobés. 2007. 199 p. Groupe de travail RST "Formulation des enrobés". Laboratoire Central des Ponts et Chaussées. Paris, França, 2007.

MEDINA, J. C. (1954), O sisal. Secretaria da Agricultura do Estado de São Paulo, 286 p. São Paulo, SP.

MENAPACE, I.; YIMING, W.; MASAD, E. (2017), Chemical analysis of surface and bulk of asphalt binders aged with accelerated weathering tester and standard aging methods. *Fuel*, Vol. 202, pp. 366-379, ISSN 0016-2361. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.04.042>.

MOMM, L. Estudo dos efeitos da granulometria sobre a macrotextura superficial do concreto asfáltico e seu comportamento mecânico. 1998. 259 p. Tese (Doutorado), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (EPUSP). São Paulo, 1998.

MOTTA L., GUERRERO A., ARAGAO F. Efeitos de propriedades morfológicas de agregados no comportamento mecânico de misturas asfálticas. 44^a RAPV – Reunião Anual de Pavimentação e 18^o ENACOR – Encontro Nacional de Conservação Rodoviária. Foz do Iguaçu, 2015. ISSN 1807-5568

MWAIKAMBO, L. Y. e ANSELL, M. P. (2002), Chemical modification of hemp, sisal, jute, and kapok fibers by alkalization. *Journal of Applied Polymer Science*, Vol. 84, Issue 12, pp.2222-2234. DOI: <https://doi.org/10.1002/app.10460>

NAPA. HMA pavement mix type selection guide. Information series 128. National Asphalt Pavement Association: U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration. 2001. Disponível em: <https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/infrastructure/pavements/asphalt/HMA.pdf>. Acesso em: 01 abr. 2022.

National Geographic Education, 2022. Greenhouse Effect. Disponível em: <https://education.nationalgeographic.org/resource/greenhouse-effect>. Acesso em: 13 fev. 2023.

National Research Council. 2010. Verifying Greenhouse Gas Emissions: Methods to Support International Climate Agreements. Washington, DC: The National Academies Press. <https://doi.org/10.17226/12883>.

NARAYANA V. L., RAO L. B. A brief review on the effect of alkali treatment on mechanical properties of various natural fiber reinforced polymer composites. *Materials Today: Proceedings*, v. 44, part 1, pg. 1988-1994. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.12.117>.

NAVEEN J., JAWAID M., CHANDRASEKAR M. Mechanical and physical properties of sisal and hybrid sisal fiber-reinforced polymer composites. *Woodhead Publishing Series in Composites Science and Engineering*, 2019, pg. 427-440. 2019. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102292-4.00021-7>.

NITISH, THAKUR N. Quality improvised of bituminous mix by natural fiber. *International Journal of Advance Research, Ideas and Innovations in Technology*, v. 4, issue 4, 2018, pg. 29-34. ISSN: 2454-132X.

NOGUEROL A. T., IGUAL M., PAGÁN-MORENO M. J. Nutritional, Physico-Chemical and Mechanical Characterization of Vegetable Fibers to Develop Fiber-Based Gel Foods. *Foods*, 2021, 10(5):1017. doi: 10.3390/foods10051017. PMID: 34066936; PMCID: PMC8148593.

OASHI M. C. G. Estudo da cadeia produtiva como subsídio para pesquisa e desenvolvimento do agronegócio do sisal na paraíba. 1999. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção) – Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1999.

OSNORBE J. F.; SINGH D. P. Sisal and other long fiber agaves. In: Walter F. *Hybridization of Crop Plants*. Madison: American Society of Agronomy - Science Societies, 1980. p. 564-575. Disponível em: <http://faculty.agron.iastate.edu/fehr/HOCP/40HOCP.pdf>. Acesso em: 12 mai. 2022. ISBN 10: 0891180346 / ISBN 13: 9780891180340.

PAN, T.; TUTUMLUER, E.; CARPENTER, S. H. Effect of Coarse Aggregate Morphology on Permanent Deformation Behavior of Hot Mix Asphalt. *Journal Of Transportation Engineering*, v. 132, n. 7, p.580-589, jul. 2006. American Society of Civil Engineers (ASCE). [http://dx.doi.org/10.1061/\(asce\)0733-947x\(2006\)132:7\(580\)](http://dx.doi.org/10.1061/(asce)0733-947x(2006)132:7(580)).

PIRES, J.S.C. Fibras naturais: Características químicas e potenciais aplicações. 2009. Trabalho de Conclusão de Curso. (Bachareado em Ciências Biológicas) - Universidade Estadual Paulista Júlio Mesquita Filho, Botucatu. 2009.

POMPERMAYER, F. M. Simulação de parceria público-privada para as rodovias federais: impactos sobre orçamento fiscal, usuários e contribuintes. Rio de Janeiro: Ipea, 2017. (Texto para Discussão, n. 2275). Disponível em: http://www.ipea.gov.br/portal/images/stories/PDFs/TDs/170301_td_2275.PDF. Acessado em: 21 jan 2023.

PREGO, A. S. S. A memória da pavimentação no Brasil. Associação Brasileira de Pavimentação (ABPv), 2001. ISBN 85-88353-01-6, 640 p. Rio de Janeiro.

RADETIC, M. (2013), Functionalization of textile materials with TiO₂ nanoparticles. *Journal of Photochemistry and Photobiology C: Photochemistry Reviews*, Vol. 16, pp. 62-76, ISSN 1389-5567. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jphotochemrev.2013.04.002>.

RAHMAN M. S., ERLINGSSON S., AHMED A. Modelling the permanent deformation of unbound granular materials in pavements. *Road Materials and Pavement Design*, 2022. DOI: 10.1080/14680629.2022.2108883.

RAZAH M. M., CHOPRA A. An Experimental Investigation of Using Sisal Fiber and Coir Fiber as An Additive in Stone Matrix Asphalt. *International Journal of Advance Science and Technology*, v. 29, n° 10S, p. 5111-5128, 2020.

REIS, J. M. L. Sisal fiber polymer mortar composites: Introductory fracture mechanic's approach. *Construction and Building Materials*, v. 37, p. 177-180, dez. 2012.

SALVADOR, R. P. Análise comparativa de métodos de ensaio para caracterização do comportamento mecânico de concreto reforçado com fibras. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.

SANTANA P. N. A. Estudo de matriz cimentícia reforçada com curauá (*Ananas comosus* var. *erectifolius*) e submetida à cura em atmosfera com excesso de dióxido de carbono (CO₂). Dissertação (Mestrado em Ciências) – Programa de Pós-Graduação em Zootecnia e Engenharia de Alimentos da Universidade de São Paulo, Universidade de São Paulo, Pirassununga, 2016.

SANTOS, H. G. S. C., SANTOS N. A. C. Falhas da infraestrutura logística no Brasil: O transporte de cargas no modal rodoviário. 2021. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Administração) – Centro Universitário do Planalto Central Aparecido dos Santos, Uniceplac, Gama, 2021.

SFI TANZANIA, 2023. Sisal plant. Disponível em: <https://www.sfitanzania.com/sisal-plant>. Acesso em: 13 fev. 2023.

SOARES J. H. M., ARRUDA D. R., AMARANTE P. A. Transformações tecnológicas e econômicas do sisal no Nordeste do Brasil. *Research, Society and Development*, v. 11, n.5, e15611527847, 2022. <http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v11i5.27847>

SILVA, O. R. F. F. A cadeia produtiva do sisal no nordeste brasileiro. Sistema de Produção, 5. ISSN 1678-8710. Embrapa Algodão. 2014. Disponível em: https://www.spo.cnptia.embrapa.br/conteudo?p_p_id=conteudoportlet_WAR_sistemasdeproducaoalf6_lgalceportlet&p_p_lifecycle=0&p_p_state=normal&p_p_mode=view&p_p_col_id=column-1&p_p_col_count=1&p_r_p_-76293187_sistemaProducaoId=3716&p_r_p_-996514994_topicoId=3267. Acesso em: 06 jun. 2022.

SILVA, O. R. R. F.; COUTINHO, W. M.; CARTAXO, W. V.; SOFIATI, V.; SILVA FILHO, J. L.; CARVALHO, O. S.; COSTA, L. B. O cultivo do sisal no nordeste brasileiro. Circular técnica, 123. Campina Grande: Embrapa-CNPA, 2008.

SILVA, R. M. Reforço de solo com adição de fibra de sisal impermeabilizada com tinta asfáltica. 2016. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Ciências Exatas e Tecnológicas) – Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Cruz das Almas, 2016.

SILVA, S. C.; BASTOS J. B. S.; SOARES, J. B. O efeito da seleção granulométrica na resistência à deformação permanente de misturas asfálticas. In: XXIX CONGRESSO NACIONAL DE PESQUISA EM TRANSPORTE DA ANPET, ANPET, Anais, Ouro Preto, 9 a 13 de novembro 2015.

SIMMONS, H. E.; VEST, R. D.; BLOMSTROM, D. C.; ROLAND, J. R.; CAIRNS, T. L. (1962), Thiacyanocarbons. Contribution N° 755 from the Central Research Department, Experimental Station, E. I. du Pont de Nemours and Co., Wilmington 98, Del., Vol. 84, pp. 4746-4756.

SINDIFIBRAS. Notas de referência sobre a cadeia produtiva do sisal na Bahia. Salvador: 2020. Disponível em: <http://www.sindicatodaindustria.com.br/publicacoes/2020/08/72,145399/notas-de-referencia-sobre-a-cadeia-produtiva-do-sisal-na-bahia.html>. Acesso em: 23 maio 2022.

SINGH G., SINGH S., KUMAR R., CHOCHAN J. Exploration of sisal fibre for modification of bituminous mix. Materials today: Proceedings, v. 48, part 5, p. 1352-1355, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.09.070>.

SOARES, F. C. Fibras e fibrilas de celulose: processo de isolamento a partir do sisal e avaliação das características dos compósitos com matriz de quitosana. 2016. Tese (Doutorado em engenharia de materiais) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais, Florianópolis, 2016.

SOUSA, M. N. DE M.; LUCENA, L. C. DE F. L.; COSTA, L. F. DA; SILVA, Y. DE M. Estudo de aplicabilidade da adição de fibras de sisal em misturas asfálticas do tipo SMA. XXXI Congresso Nacional de Pesquisa em Transporte da ANPET, Recife, 2017.

SOUSA, M. L. A produção de sisal na Paraíba: O município de Cuité um estudo de caso. Dissertação (Mestrado em economia rural) – Centro de Humanidades, Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande, 1987.

SPEIGHT, J. G. Asphalt technology. Asphalt materials science and technology. pg. 361–408. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-800273-5.00009-X>

SPECHT, L. P.; ROZEK, T.; HIRSCH, F.; SANTOS, R. T. Avaliação da macrot textura de pavimentos através do ensaio de mancha de areia. 2007. Teoria e Prática na Engenharia Civil, Vol. 10, pg. 30 – 38. Disponível em: http://www.editoradunas.com.br/revistatpec/Art5_N10.pdf. Acesso em: 26 abr. 2022.

STASIAK, D. Análise comparativa de misturas do tipo BBDr com o uso de ligante de alto módulo HiMA. 2021. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em engenharia civil de infraestrutura) – Departamento de Engenharias da Mobilidade (EMB), Centro Tecnológico de Joinville, Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2021.

SUINAGA, F. A.; SILVA, O. R. R. F.; COUTINHO, W. M. Cultivo do sisal. Campina Grande, PB: EMBRAPA Algodão, 2006. https://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/territorio_sisal/arvore/CONT000fbav2rse02wx5eo0wyh66jxfqzqg.html. Acesso em: 21 jun 2022.

SULTANA, S; BHASIN, A. (2014), Effect of chemical composition on rheology and mechanical properties of asphalt binder. Construction and Building Materials, Vol. 72, pp. 293-300, ISSN 0950-0618. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.09.022>.

SYDENSTRICKER, T. H. D., MOCHNAZ, S., AMICO, S. C., 2003, “Pull-out and Other Evaluations in Sisal-Reinforced Polyester Biocomposites”, Polymer Testing, v.22, pg. 375-380.

TOWNSEND, T. Natural fibres and the world economy July 2019. Discover Natural Fibres Initiative- DNFI, 2019. Disponível em: https://dnfi.org/coir/natural-fibres-and-the-world-economy-july-2019_18043/. Acesso em: 15 maio 2022.

TURCO, L. A. Influência da variação do diâmetro máximo de curvas granulométricas nos parâmetros de dosagem e funcionalidade de misturas asfálticas densas. 2021. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em engenharia civil de infraestrutura) – Departamento de Engenharias da Mobilidade, Centro Tecnológico de Joinville, Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2021.

VAN SCHOOR, A.; JACOBI, E.; LUST, S.; FLEMMING, H.; MÜLLER, O. W. (1961), Fungicidal compound of the formula C₈N₄S₃. United States Patent Office, nº 3.000.780, Serial Number 809.481, 4 p. Darmstadt, Germany.

VÁSQUEZ, P. C. H (2017). Cinética de inibição por produto e substrato da hidrólise do bagaço de cana de açúcar. Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química (PPGEQ) da Universidade Estadual de Campinas, 159 p. Campinas, SP.

VITÓRIA P. I. S. Métodos de reparos de fissuras em pavimentos rígidos em sítios aeroportuários. 2016. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil de Infraestrutura) – Escola Politécnica da Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2016.

VUORINNE I., HEISKANEN J., MAGHENDA M., MWANGALA L, MUUKKONEN P, PELLIKKA P. K. E. Allometric models for estimating leaf biomass of sisal in a semi-arid environment in Kenya. Biomass and Bioenergy, v. 155, e106294, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2021.106294>.

VIGNESHWARAN S., SUNDARAKANNAN R., JOHN K.M., JOHNSON R. D. J., PRASATH K. A., AJITH S., ARUMUGAPRABU V., UTHAYAKUMAR M. Recent advancement in the natural fiber polymer composites: A comprehensive review. *Journal of Cleaner Production*, v. 277, 124109. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124109>.

WU B. ZHAOHUI P., XIAO P, LOU K, WU X. Influence of fiber-asphalt interface property on crack resistance of asphalt mixture. *Case studies in construction materials*, v. 17, e01703, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01703>

XAVIER, R. M. Avaliação dos parâmetros de dosagem de misturas asfálticas do tipo Grave-Bitume. 2022. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em engenharia civil de infraestrutura) –Departamento de Engenharias da Mobilidade, Centro Tecnológico de Joinville, Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2022.

YU, X; ZAUMANIS, M.; SANTOS, S. DOS; POULIKAKOS, L D. (2014), Rheological, microscopic, and chemical characterization of the rejuvenating effect on asphalt binders. *Fuel*, Vol. 135, pp. 162-171, ISSN 0016-2361. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2014.06.038>

ZAMAN, M.; TAREFDER, R. A.; Evaluation of rutting potential of hot mix asphalt using the asphalt pavement analyzer. 2002. Final Report. The University of Oklahoma: Oklahoma Department of Transportation Planning and Research Division. v. 2153, out. 2002.