



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO DE JOINVILLE
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA E CIÊNCIAS MECÂNICAS

Felipe de Hollanda Evaldt

AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO FUNCIONAL DE MISTURAS ASFÁLTICAS
DENSAS DO TIPO BBSG COM A INCORPORAÇÃO DE FIBRA DE SISAL

Joinville

2023

Felipe de Hollanda Evaldt

AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO FUNCIONAL DE MISTURAS ASFÁLTICAS
DENSAS DO TIPO BBSG COM A INCORPORAÇÃO DE FIBRA DE SISAL

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciências Mecânicas (Pós-ECM) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia e Ciências Mecânicas.

Orientador: Prof. Breno Salgado Barra, Dr.

Joinville

2023

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Evaldt, Felipe de Hollanda

Avaliação do comportamento funcional de misturas
asfálticas densas do tipo BBSG com a incorporação de fibra
de sisal / Felipe de Hollanda Evaldt ; orientador, Breno
Salgado Barra, 2023.

121 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Catarina, Joinville, Programa de Pós-Graduação em
Engenharia e Ciências Mecânicas, Florianópolis, 2023.

Inclui referências.

1. Engenharia e Ciências Mecânicas. 2. Formulação. 3.
Misturas asfálticas. 4. Fibra de sisal. 5. BBSG. I. Barra,
Breno Salgado. II. Universidade Federal de Santa Catarina.
Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciências Mecânicas.
III. Título.

Felipe de Hollanda Evaldt

AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO FUNCIONAL DE MISTURAS ASFÁLTICAS
DENSAS DO TIPO BBSG COM A INCORPORAÇÃO DE FIBRA DE SISAL

O presente trabalho em nível de mestrado foi avaliado e aprovado por banca examinadora
composta pelos seguintes membros:

Prof. João Victor Staub de Melo, Dr. Eng.
Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC

Prof. Alexandre Mikowski, Dr. Fís.
Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC

C. R. Mai-Lan Nguyen, Dr. Eng.
Université Gustave Eiffel – UGE – Nantes/France

Certificamos que esta é a **versão original e final** do trabalho de conclusão que foi
julgado adequado para obtenção do título de mestre em Engenharia e Ciências Mecânicas.

Prof. Wagner Mauricio Pachekoski, Dr. Eng.
Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciências Mecânicas

Prof. Breno Salgado Barra, Dr. Eng.
Orientador

Joinville, 30 de março de 2023.

Dedico este trabalho à minha esposa Yara, minha parceira de vida, melhor amiga, e artista preferida.

AGRADECIMENTOS

Acima de tudo, agradeço a Deus, pois tenho convicção plena de que somente a Sua graça, bondade e misericórdia me guiaram e sustentaram em todos os momentos até aqui. Seus planos são sempre maiores e melhores.

Aos meus pais, Luiz e Elizete, que ao longo de toda a vida sempre dedicaram o possível e o impossível para que eu tivesse uma boa educação, um bom ambiente familiar e um caráter íntegro. Suas renúncias em prol da família são mais valiosas do que tudo!

À minha esposa, Yara, por me acompanhar pacientemente e integralmente durante toda essa jornada. Seu apoio e compreensão nos momentos mais difíceis e desafiadores dessa jornada revelam o valor de tê-la ao meu lado!

Ao meu orientador, Prof. Dr. Breno Salgado Barra, por depositar confiança em mim, até mesmo em momentos que nem mesmo eu era capaz de confiar. Sua disponibilidade, paciência e compreensão ao longo de toda essa jornada tornaram possível este trabalho.

Aos meus amigos e colegas do LDTPav, Humberto Cosmos Ferreira de Sales Silverio da Silva Volpato, Natan Assis Monteiro, Rafael Cristyan Fronza e Ruan Marcos Xavier. Esta jornada foi mais leve graças ao apoio de cada um de vocês.

Ao meu colega Thiago Persike, pelo apoio no desenvolvimento do trabalho, e por disponibilizar os resultados obtidos em sua pesquisa para utilização como parâmetro de referência nas discussões deste trabalho.

À equipe do Laboratório de Pavimentação (LabPav) da UFSC em Florianópolis/SC, por disponibilizar os equipamentos necessários para realização do ensaio de deformação permanente.

À equipe do Laboratório de Caracterização Microestrutural (LACAMI) do Centro Tecnológico SATC, pela realização dos ensaios de caracterização das fibras de sisal.

Por fim, agradeço às empresas Rudnick Minérios, CBB Asfaltos e ao Laboratório de Desenvolvimento e Tecnologia em Pavimentação (LDTPav) pela disponibilização dos insumos e infraestrutura para a realização desta pesquisa.

Muito obrigado!

RESUMO

O objetivo principal desta pesquisa é avaliar o comportamento funcional de misturas asfálticas densas do tipo *Béton Bitumineux Semi-Grenus* (BBSG), com a incorporação de fibra de sisal, a fim de verificar a viabilidade técnica de sua utilização no âmbito da demanda global progressiva pela utilização de materiais ecossustentáveis, no que diz respeito à produção de insumos aplicados nos serviços de pavimentação. Para tanto, as formulações testadas compreenderam o uso de ligante betuminoso 30/45 em sua forma pura, e frações granulares de origem gnáissica, com granulometria distribuída a partir do método teórico utilizando as equações de *Füller-Talbot*. A fibra de sisal foi incorporada nos teores de 0,3 % e 0,5 %, em relação ao volume das misturas asfálticas, tendo os seus respectivos resultados comparados às formulações de referência previamente estudadas, sem a presença de sisal. A caracterização da referida fibra abrangeu as análises de microscopia eletrônica de varredura (MEV), espectroscopia por fluorescência de Raio-X (FRX), difratometria de Raio-X (DRX), espectroscopia infravermelha por transformada de Fourier (FTIR), termogravimetria (TGA) e calorimetria diferencial (DSC). As misturas asfálticas foram testadas com base nos princípios técnicos e conceituais da metodologia francesa de formulação, com enfoque nos parâmetros funcionais previstos em sua sequência avaliativa, a saber: habilidade de compactação na Prensa de Compactação Giratória (PCG), ação deletéria da água no ensaio de Duriez a 18° C e resistência à deformação permanente a 60 °C. Os resultados obtidos indicam que a incorporação de fibras de sisal às misturas asfálticas elevou os percentuais de vazios quando comparados aos obtidos nas formulações de referência, em razão do efeito trama gerado no procedimento de usinagem, demandando maiores teores de ligante betuminoso para atingir condições adequadas de compactação, trabalhabilidade e estabilidade do arranjo granulométrico. A resistência à ação deletéria da água também se mostrou prejudicada, devido ao comportamento higroscópico do sisal, que tende a absorver água no interior de sua estrutura reticular, expandindo seu volume, aliado à natureza eletronegativa tanto do ligante betuminoso quanto das fibras, dificultando a formação de um dipolo elétrico efetivo e, conseqüentemente, o recobrimento completo dos fios. Ainda, a disposição intersticial dos fios fibrosos na estrutura das misturas asfálticas, muitas vezes de forma concentrada e tramada, contribuiu para reduções importantes do contato direto das frações granulares, minorando o intertravamento das partículas e a resistência ao cisalhamento do arranjo granulométrico, quando solicitados por carregamento dinâmico. Estes fatores, aliados à necessidade do aporte de maiores dosagens de ligante betuminoso nas dosagens, conforme apontado nos ensaios de PCG, acentuaram a ocorrência do fenômeno da fluência e o efeito lubrificante nas interfaces granulares, diminuindo a resistência à deformação permanente das misturas asfálticas.

Palavras-chave: formulação, misturas asfálticas, fibras de sisal, BBSG, metodologia francesa.

ABSTRACT

The main aim of this research is to evaluate the functional behavior of dense asphalt mixes so-called *Béton Bitumineux Semi-Grenus* (BBSG), with incorporation of sisal fiber, aiming to verify its technical feasibility comprising the progressive global demand by the use of ecosustainable materials, with regards to production of inputs applied to paving services. A 30/45 pen grade neat asphalt binder and gneissic granular fractions were used to produce the asphalt mixes, with granulometric distribution from theoretical method by considering Füller-Talbot's equations. Sisal fiber contents were incorporated at 0.3 % and 0.5 % in relation to the volume of asphalt mixes, and their respective results compared to those from reference formulation with no fiber content. The characterization of the referred fiber took into account analyses such as: scanning electron microscopy (SEM), spectroscopy by X-Ray fluorescence (XRF), diffractometry by X-Ray (DRX), Fourier-transform infrared spectroscopy (FTIR), thermogravimetry (TGA) and differential scanning calorimetry (DSC). The asphalt mixes were tested respecting technical and conceptive principles of the French methodology, focusing on the functional parameters predicted in its evaluation sequence: compaction ability with Compacting Shear Press, deleterious action of water in Duriez test at 18 °C and rutting resistance at 60 °C. The results obtained indicate that the incorporation of sisal fiber to the asphalt mixes raised their air void contents, when compared to the reference formulations, due to the weft effect generated during the mixing process, demanding higher asphalt binder contents to reach suitable conditions of compacity, workability and stability of the granulometric arrangement. The resistance to deleterious action of water also was harmed, considering the hygroscopic behavior of sisal, which tends to absorb water in its reticular internal structure, expanding its own volume, combined with the electronegative nature of both asphalt binder and the fibers, hindering the formation of an effective dipole and, consequently, the complete covering of the strands. Furthermore, the interstitial arrangement of the fibrous strands in the structure of the asphalt mixes, often in a concentrated and woven form, has contributed for important lacks with regards to direct contact of the granular fractions, reducing the interlocking of the particles and the shear resistance of the granulometric distribution, when requested by dynamic loading. These mentioned factors, combined with the need to add higher dosages of bituminous binder, as pointed out in the PCG tests, accentuated the occurrence of the creep phenomenon and the lubricating effect on the granular interfaces, decreasing the rutting resistance of the asphalt mixes.

Keywords: formulation, asphalt mixes, sisal fibers, BBSG, French methodology.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1	- Fluxograma de atividades realizadas na pesquisa	21
Figura 2.1	- Seção esquemática de um pavimento do tipo <i>chaussée souple</i>	27
Figura 2.2	- Seção esquemática de um pavimento do tipo <i>chaussées bitumineuses épais</i>	28
Figura 2.3	- Desenho ampliado da deformação permanente gerada pela fluência da mistura asfáltica	30
Figura 2.4	- Irregularidades da superfície do pavimento na escala da macrotextura e microtextura	31
Figura 3.1	- Fibra de sisal	34
Figura 3.2	- Delimitação do Território do Sisal	35
Figura 3.3	- Detalhe de uma lavoura com (a) <i>Agave Sisalana</i> e com (b) <i>Agave híbrido 11648</i>	36
Figura 3.4	- Processo de colheita das folhas de sisal	37
Figura 3.5	- (a) Máquina desfibradora paraibana em operação e (b) detalhe do rotor de raspagem	38
Figura 3.6	- Imersão da fibra de sisal em tanque com água para retirada de impurezas	39
Figura 3.7	- Fibras de sisal estendidas para secagem ao sol: em primeiro plano fibras recém-estendidas, e ao fundo, fibras em estágio mais avançado de secagem	39
Figura 3.8	- Organização estrutural multiescala de uma fibra de sisal	41
Figura 4.1	- Níveis da metodologia francesa	47
Figura 4.2	- Frações homogêneas obtidas após o peneiramento dos granulares	50
Figura 4.3	- Curva de viscosidade <i>Saybolt-Furol</i> para o CAP 30/45	52
Figura 4.4	- Amostras enviadas para caracterização laboratorial: (a) fios de sisal inteiros, (b) sisal cortado em fios de 15 mm, (c) mástique de ligante betuminoso com 0,3 % de sisal, (d) mástique de ligante betuminoso com 0,5 % de sisal, e (e) ligante puro	54
Figura 4.5	- 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	55

Figura 4.6	- Partículas sólidas aderidas à parede dos fios da fibra de sisal (aumento de 429 vezes)	56
Figura 4.7	- Difratoograma das amostras de fibra de sisal	59
Figura 4.8	- TGA/DTGA da amostra de ligante betuminoso + 0,3 % de sisal	61
Figura 4.9	- TGA/DTGA da amostra de ligante betuminoso + 0,5 % de sisal	61
Figura 4.10	- Espectros por FTIR das amostras com ligante betuminoso	62
Figura 4.11	- Representação gráfica da composição granulométrica calculada	66
Figura 4.12	- Procedimento de corte das fibras de sisal	67
Figura 4.13	- Processo de pesagem e separação das amostras de sisal	68
Figura 4.14	- Etapas do processo de usinagem das misturas asfálticas com fibras de sisal	69
Figura 4.15	- Usinagem das misturas asfálticas com incorporação de fibras de sisal	70
Figura 4.16	- (a) Formação de emaranhados de fios de sisal durante o processo de usinagem e (b) detalhe de um emaranhado	71
Figura 4.17	- Ensaio MVR	72
Figura 4.18	- (a) Prensa de Compactação Giratória (PCG-3) e (b) seu princípio de funcionamento	74
Figura 4.19	- Controle de temperatura com auxílio de termopar digital	76
Figura 4.20	- (a) Processo de desmoldagem dos corpos de prova, e (b) corpos de prova desmoldados após o ensaio	77
Figura 4.21	- Procedimentos de compactação por duplo pistão no ensaio Duriez	78
Figura 4.22	- Corpos de prova do ensaio de Duriez desmoldados	79
Figura 4.23	- Detalhe do processo de saturação dos corpos de prova na câmara à vácuo	79
Figura 4.24	- Condicionamento dos corpos de prova em imersão em água à temperatura de $18\text{ °C} \pm 1\text{ °C}$	80
Figura 4.25	- Ruptura à compressão simples dos corpos de prova: (a) prensa hidráulica, (b) corpo de prova antes da ruptura e (c) corpo de prova após da ruptura	80

Figura 4.26	- Processo de compactação das placas na mesa compactadora pneumática: (a) preenchimento do molde da placa com a mistura asfáltica, (b) regularização da mistura no molde, (c, d) compactação da mistura asfáltica e (e) placa compactada.	82
Figura 4.27	- Máquina de deformação permanente	83
Figura 4.28	- Pontos de leitura da deformação permanente	83
Figura 5.1	- Habilidade de compactação na PCG das misturas asfálticas com 0,3 % de sisal	86
Figura 5.2	- Habilidade de compactação na PCG das misturas asfálticas com 0,5 % de sisal.	86
Figura 5.3	- Aspecto visual da superfície dos corpos de prova pós o ensaio na PCG: emaranhados de fios de sisal (a) numa mistura com 0,3 % de sisal, e (b) numa mistura com 0,5 % de sisal, ambas com 5,82 % de ligante	88
Figura 5.4	- Resistência à ação deletéria da água nas misturas asfálticas testadas	90
Figura 5.5	- Corpo de prova do ensaio de Duriez com 0,3 % de sisal e 5,50% de ligante, (a) aberto após o rompimento à compressão simples, apresentando descolamento da película de ligante (b) nos fios de sisal e (c) nos granulares	91
Figura 5.6	- Corpo de prova do ensaio de Duriez com 0,5 % de sisal e 5,50% de ligante, (a) aberto após o rompimento à compressão simples, apresentando descolamento da película de ligante (b) nos fios de sisal e (c) nos granulares	91
Figura 5.7	- Afundamento na trilha de roda das misturas com 0,3 % de sisal e das misturas de referência	93
Figura 5.8	- Afundamento na trilha de roda das misturas com 0,5 % de sisal e das misturas de referência	93
Figura 5.9	- Afundamento na trilha de roda das misturas com 0,3 % e 0,5 % de sisal	94

Figura 5.10	- Seção transversal das placas de mistura asfáltica antes e depois do ensaio de deformação permanente: mistura de referência com (a) 4,70 % e (b) 4,86 % de ligante; mistura com 0,3 % de sisal e (c) 5,18 %, (d) 5,50 % e (e) 5,82 % de ligante; mistura com 0,5 % de sisal e (f) 5,50 %, (g) 5,82 % e (h) 6,14 % de ligante	95
Figura 5.11	- Representação esquemática dos interstícios estruturais (a) de uma mistura asfáltica com fibra de sisal e (b) de uma mistura asfáltica convencional	97
Figura 5.12	- Arranjo granulométrico verificado através da seção transversal das misturas asfálticas (a) de referência, (b) com 0,3% de sisal e (c) com 0,5% de sisal	98

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1	- Classes de tráfego de acordo com a metodologia francesa	27
Tabela 2.2	- Pontos de controle da composição granulométrica da mistura tipo BBSG 0/14 mm	33
Tabela 3.1	- Características químicas da fibra de sisal	42
Tabela 3.2	- Características físicas da fibra de sisal	42
Tabela 4.1	- Caracterização dos materiais granulares	50
Tabela 4.2	- Análise textural de Pó de pedra	51
Tabela 4.3	- Laudo técnico do ligante betuminoso	52
Tabela 4.4	- Teores de partida de ligante betuminoso	53
Tabela 4.5	- Composição química obtida por EDS no procedimento de MEV	56
Tabela 4.6	- Distribuição percentual dos elementos químicos componentes da fibra de sisal por FRX	57
Tabela 4.7	- Composição granulométrica calculada pelo método racional	65
Tabela 4.8	- MVR das misturas asfálticas	73
Tabela 5.1	- Teores de vazios obtidos no ensaio de avaliação da habilidade de compactação na PCG	85
Tabela 5.2	- Resultados da relação r/R no ensaio de Duriez a 18 °C	89
Tabela 5.3	- Afundamento gerado na trilha de roda no ensaio de deformação permanente a 60 °C	92

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AASHTO	-	<i>American Association of State Highway and Transportation Officials</i>
ABNT	-	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AFNOR	-	<i>Association Française de Normalisation</i>
AGEITEC	-	Agência Embrapa de Informação Tecnológica
ASTM	-	<i>American Society for Testing and Materials</i>
BBDr	-	<i>Béton Bitumineux Drainant</i>
BBM	-	<i>Béton Bitumineux Mince</i>
BBME	-	<i>Béton Bitumineux à Module Élevé</i>
BBS	-	<i>Béton Bitumineux pour chaussée souples à faible trafic</i>
BBSG	-	<i>Béton Bitumineux Semi-Grenus</i>
BBTM	-	<i>Béton Bitumineux Très Mince</i>
CAP	-	Cimento Asfáltico de Petróleo
CIMBETON	-	<i>Centre d'Information sur le Ciment et ses Applications</i>
COD	-	<i>Crystallography Open Database</i>
COSIBRA	-	Companhia Sisal do Brasil
CSFN	-	Câmara Setorial de Fibras Naturais
DNER	-	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DNIT	-	Departamento Nacional de Infraestrutura e Transportes
DSC	-	Calorimetria Diferencial
DRX	-	Difração de Raio-X
EB-EME	-	<i>Enrobé Bitumineux – Enrobé à Module Élevé</i>
EB-GB	-	<i>Enrobé Bitumineux Grave-Bitume</i>
EDS	-	Espectroscopia por Energia Dispersiva
EMBRAPA	-	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
EPUSP	-	Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
FAO	-	<i>Food and Agriculture Organization of the United Nations</i>
FRX	-	Fluorescência de Raio-X
FTIR	-	Espectroscopia Infravermelha por transformada de Fourier
GLAT	-	<i>Grandes Liaisons d'aménagement du Territoire</i>
IDRRIM	-	<i>Institut des Routes, des Rues et des Infrastructures pour la Mobilité</i>

IFSTTAR	-	<i>Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de L'aménagement et des Réseaux</i>
LabPav	-	Laboratório de Pavimentação
LACAMI	-	Laboratório de Caracterização Microestrutural
LACRA	-	<i>Liaisons Assurant la Continuité du Réseau Autoroutier</i>
LCPC	-	<i>Laboratoire Central des Ponts et Chaussées</i>
LDTPav	-	Laboratório de Desenvolvimento e Tecnologia em Pavimentação
Ltda	-	Limitada
LTP	-	Laboratório de Tecnologia de Pavimentação
MEA	-	Massa Específica Aparente
MEV	-	Microscopia Eletrônica de Varredura
MVR	-	Massa Volumétrica Real
MVRg	-	Massa Volumétrica Real dos Granulares
NBR	-	Norma Brasileira
PCG	-	Prensa de Compactação Giratória
PDM	-	Projeto de Dissertação de Mestrado
PF	-	Perda ao Fogo
PNL	-	Plano Nacional de Logística
PR	-	Paraná
REPLAN	-	Refinaria de Paulínia
SC	-	Santa Catarina
SMA	-	<i>Stone Matrix Asphalt</i>
SP	-	São Paulo
Superpave	-	<i>Superior Performance Pavement</i>
TGA	-	Termogravimetria
UFSC	-	Universidade Federal de Santa Catarina
UGE	-	<i>Université Gustave Eiffel</i>
UV	-	Ultravioleta
VRNS	-	<i>Voies du Réseau non Structurant</i>
VRS	-	<i>Voies du Réseau Structurant</i>
VRU	-	<i>Voies Rapides Urbaines</i>

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

1.1	-	CONSIDERAÇÕES GERAIS	17
1.2	-	OBJETIVOS	19
1.2.1	-	Objetivo Geral	19
1.2.2	-	Objetivos Específicos	19
1.3	-	PROCEDIMENTOS PARA ALCANÇAR OS OBJETIVOS	20
1.4	-	DELIMITAÇÕES DO ESPAÇO DA PESQUISA	22
1.5	-	JUSTIFICATIVA: RELEVÂNCIA DO TEMA	23
1.6	-	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	24

CAPÍTULO 2 - ESTRUTURAS DE PAVIMENTO E MISTURAS ASFÁLTICAS

2.1	-	CONSIDERAÇÕES GERAIS	25
2.2	-	TIPOS DE ESTRUTURAS DE PAVIMENTO E DE MISTURAS ASFÁLTICAS NA METODOLOGIA FRANCESA	26
2.2.1	-	Aspectos gerais sobre misturas asfálticas	28
2.2.1.1	-	Mecânicos	29
2.2.1.2	-	Funcionais	30
2.2.1.3	-	Classificação das misturas asfálticas	31

CAPÍTULO 3 - FIBRAS DE SISAL

3.1	-	ASPECTOS GERAIS E RELEVÂNCIA SOCIOECONÔMICA	34
3.2	-	NOÇÕES GERAIS DO PROCESSO DE OBTENÇÃO DA FIBRA	36
3.3	-	CARACTERÍSTICAS E PROPRIEDADES FÍSICAS DA FIBRA	40

3.4	- UTILIZAÇÃO DE FIBRAS DE SISAL EM MISTURAS ASFÁLTICAS	43
-----	--	----

CAPÍTULO 4 - MATERIAIS E MÉTODOS

4.1	- CONSIDERAÇÕES GERAIS	46
4.2	- CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS	48
4.2.1	- Granulares	49
4.2.2	- Ligante betuminoso	52
4.2.3	- Fibras de sisal	54
4.2.3.1	- Microscopia eletrônica de varredura (MEV)	55
4.2.3.2	- Espectrometria por fluorescência de Raios-X (FRX)	57
4.2.3.3	- Difractometria de Raios-X (DRX)	58
4.2.3.4	- Termogravimetria (TGA) e Calorimetria Diferencial (DSC)	60
4.2.3.5	- Espectroscopia infravermelha por transformada de Fourier (FTIR)	62
4.3	- MÉTODOS APLICADOS	64
4.3.1	- Composição granulométrica	64
4.3.2	- Preparação das fibras de sisal	66
4.3.3	- Incorporação das fibras de sisal à mistura asfáltica durante o processo de usinagem	69
4.3.4	- Massa Volumétrica Real (MVR)	72
4.3.5	- Prensa de compactação Giratória (PCG)	74
4.3.6	- Ensaio de Duriez	78
4.3.7	- Deformação permanente	81

CAPÍTULO 5 - RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1	- HABILIDADE DE COMPACTAÇÃO NA PCG	85
5.2	- RESISTÊNCIA À AÇÃO DELETÉRIA DA ÁGUA	89
5.3	- RESISTÊNCIA À DEFORMAÇÃO PERMANENTE	92

CAPÍTULO 6 - CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	100
REFERÊNCIAS	103

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

Misturas de concreto asfáltico estão diretamente relacionadas à infraestrutura e ao desenvolvimento econômico mundial, viabilizando a cadeia logística de bens e serviços. A vasta aplicabilidade destes materiais, associada à extensa lista de características físicas, químicas, mecânicas e reológicas, têm levado cientistas do mundo inteiro a desenvolver estudos visando aprimorar as metodologias existentes, bem como desenvolver novos métodos de aplicação destes materiais (DHANDAPANI; MULLAPUDI, 2023; LV *et al.*, 2023).

A formulação de misturas de concreto asfáltico voltadas para a pavimentação é um processo complexo e minucioso, interdependente de diversos fatores que abrangem desde as características, proporções e dosagens dos materiais empregados, como também aspectos relacionados ao local de aplicação, finalidade de uso, tipo de solicitação, intemperismo, e demais fatores específicos a cada caso (CAO *et al.*, 2022; MACIEJEWSKI *et al.*, 2022).

Diversas metodologias de formulação de misturas asfálticas têm sido desenvolvidas com o intuito de encontrar os melhores parâmetros de seleção e dosagem dos materiais, análise e estudo da interação entre os componentes das misturas, e buscando equalizar todos estes aspectos com parâmetros de viabilidade técnica, econômica e funcional (PEREIRA; PAIS, 2017; TUTU; NTRAMAH; TUFFOUR, 2022).

Neste contexto, destaca-se a metodologia francesa de formulação de misturas asfálticas. Instituições de vanguarda científica, como o IFSTTAR (*Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de L'aménagement et des Réseaux*), antigo LCPC (*Laboratoire Central des Ponts et Chaussées*) de Nantes e, atual UGE (*Université Gustave Eiffel*), têm desenvolvido análises e estudos sistemáticos que proporcionaram esta metodologia alcançar uma estreita relação entre campo e laboratório (MANUEL LPC, 2007; IFSTTAR, 2020).

A referida metodologia apresenta diversas famílias de misturas de concreto asfáltico, com características e aplicações previamente estudadas e conhecidas, enfocando tanto os aspectos funcionais quanto estruturais das estruturas de pavimento a que são destinadas (LCPC, 2005).

Uma destas famílias denomina-se BBSG (*Béton Bitumineux Semi-Grenus*), caracterizada por possuir uma curva granulométrica densa e contínua, e destinar-se à aplicação em camadas de ligação e rolamento, com espessuras de 6,0 cm a 9,0 cm (LCPC, 1994).

Pelo viés funcional a que este tipo de mistura é destinado, alguns parâmetros técnicos são mais preponderantes, como, por exemplo, um elevado grau de resistência à deformação permanente e capacidade de drenabilidade pela macrotextura superficial. Entretanto, isto deve ser atingido sem prejudicar o equilíbrio entre as demais características físicas, como resistência à ação da água, e habilidade de compactação (ANDRADE *et al.*, 2020).

No âmbito das interrelações entre estes parâmetros técnicos e funcionais, e concomitante ao crescente apelo ecológico e sustentável que tem ganhado cada vez mais notoriedade em todas as áreas de conhecimento, tem-se intensificado a busca por matérias-primas sustentáveis e renováveis que possam contribuir de maneira positiva em características importantes de misturas de concreto asfáltico (WU; MONTALVO, 2021; LU *et al.*, 2023), e neste contexto, destacam-se as fibras de sisal (KARAHANÇER *et al.*, 2019; RAZAHI; CHOPRA, 2020).

O Brasil é o maior mundial de sisal, e o cultivo desse espécime no país remonta ao início do século XX, na Bahia. Em virtude de sua adaptação ao clima semiárido, tornou-se uma das principais atividades econômicas no interior dos estados de Paraíba, Pernambuco e da Bahia, sendo este último responsável por 90 % da produção nacional (EMBRAPA, 2021a).

Estas fibras estão entre as mais duras encontradas na natureza, apresentando elevada resistência à tração, fácil maleabilidade, boa permeabilidade, bem como facilidade de manuseio e armazenagem (BAHJA *et al.*, 2021). Tais características proporcionam que as fibras de sisal encontrem vasta aplicabilidade em diversos setores e serviços, que abrangem desde o mercado de arquitetura, decoração, mobiliário e até mesmo a agropecuária e engenharia (BEKELE; LEMU; JIRU, 2021).

Não obstante, algumas características específicas destas fibras, como relativa maleabilidade e resistência à tração têm corroborado nos resultados obtidos em estudos, sugerindo que a incorporação de fibras de sisal em misturas asfálticas pode contribuir positivamente em algumas propriedades físicas e mecânicas relevantes destes materiais (AKHIL; RAMU; SHETTY, 2019; KAR; GIRI; PANDA, 2019).

Neste contexto, esta pesquisa avalia o comportamento funcional de misturas asfálticas do tipo BBSG 0/14 mm com a incorporação de fibras de sisal em diferentes teores, a fim de verificar o efeito e a viabilidade técnica deste insumo nas propriedades físicas e mecânicas das

formulações testadas, em comparação a misturas convencionais de referência previamente elaboradas e testadas por Persike (2023), do mesmo tipo, porém, sem a incorporação destas fibras.

1.2 OBJETIVOS

Os objetivos definidos para esta pesquisa são:

1.2.1 Objetivo Geral

Avaliar, em âmbito laboratorial, o comportamento funcional de misturas asfálticas densas do tipo BBSG, com a incorporação de fibras de sisal, em comparação com formulações de mesma característica, porém elaboradas apenas com frações britadas.

1.2.2 Objetivos Específicos

Para alcançar o objetivo geral proposto, foram traçados os seguintes objetivos específicos:

- Caracterizar os materiais utilizados na produção das misturas asfálticas estudadas (partículas granulares, ligante betuminoso e fibras de sisal);
- Propor a formulação de duas misturas asfálticas densas do tipo BBSG, de graduação 0/14 mm, com incorporação, respectivamente, de 0,3 % e 0,5 % de fibras de sisal na composição.
- Verificar a habilidade de compactação das formulações propostas com a utilização da Prensa de Compactação Giratória (PCG);
- Avaliar a resistência à ação da água no ensaio de Duriez a 18 °C;
- Determinar a resistência à deformação permanente na trilha de roda a 60 °C;

- Avaliar, comparativamente, o efeito da adição dos diferentes teores aplicados de fibra de sisal nas misturas asfálticas, em relação aos parâmetros obtidos para as misturas de referência adotadas, de mesma formulação, produzidas apenas com frações britadas, previamente elaboradas e estudadas por Persike (2023);
- Inferir, com base nos dados obtidos pela campanha experimental, considerações sobre a viabilidade de aplicação de fibras de sisal em misturas asfálticas de graduação densa, bem como propor sugestões para trabalhos futuros.

1.3 PROCEDIMENTOS PARA ALCANÇAR OS OBJETIVOS

O desenvolvimento desta pesquisa iniciou com a busca na literatura científica por pesquisas que pudessem balizar as atividades de investigação das propriedades de misturas asfálticas similares às propostas nesta pesquisa, sobretudo aquelas com incorporação de fibras de sisal.

Trabalhos como o de Barra (2009), Siroma (2018), Clara (2020) e Persike (2023) encontraram valores de referência para misturas densas do tipo BBSG, abrangendo uma faixa de teores de ligante betuminoso entre 4,0 % e 6,0 %.

Pesquisas como as de Ramalingam, Murugasan e Nagabhushana (2017), Sousa *et al.* (2017), Kumar e Ravitheja (2019) e Singh *et al.* (2021) analisaram o comportamento mecânico de misturas asfálticas com a incorporação de fibras de sisal, e verificaram resultados satisfatórios com teores de fibra entre 0,3 % e 0,5 %, enquanto o comprimento de fios em 15 mm foi o mais referenciado nestes mesmos trabalhos.

Portanto, com base nas referências pesquisadas, definiu-se que nesta pesquisa as fibras de sisal seriam adicionadas às misturas asfálticas nos mesmos teores e comprimentos de fios.

O processo de análise da viabilidade das misturas asfálticas propostas seguiu os preceitos da metodologia francesa de formulação de misturas asfálticas, dada a excelente relação campo-laboratório que esta possui, de 0,9 a 1,3, conferindo credibilidade aos resultados (MANUEL LPC, 2007).

Os ensaios realizados para a avaliação do comportamento funcional das misturas asfálticas foram a avaliação da habilidade de compactação na Prensa de Compactação Giratória (PCG) (AFNOR NF EN 12697-31, 2019); ensaio de Duriez a 18 °C (AFNOR NF EN 12697-12, 2018) para avaliação da ação deletéria da água; e ensaio de deformação permanente

a 60 °C (AFNOR NF EN 12697-22, 2020) para análise da resistência ao afundamento na trilha de roda.

Após a realização dos ensaios, os resultados foram compilados, avaliados segundo os parâmetros de referência das normas citadas, e comparados aos resultados obtidos com as misturas de referência adotadas. A partir disto, foram realizadas as discussões correspondentes, acerca da viabilidade de aplicação das formulações propostas nesta pesquisa.

A Figura 1.1 ilustra o fluxograma das atividades realizadas na pesquisa.

Figura 1.1 – Fluxograma de atividades realizadas na pesquisa.



Fonte: Autor.

As frações granulares utilizadas na produção das misturas asfálticas são provenientes do município de Joinville/SC, fornecidos pela empresa Rudnick Minérios Ltda, tendo sido previamente caracterizadas por Clara (2020) e Persike (2023).

O ligante betuminoso utilizado é oriundo da refinaria REPLAN, da Petrobrás, localizada no município de Paulínia/SP, fornecido pela empresa CBB Asfaltos, de Curitiba/PR. A caracterização deste material já foi previamente realizada a partir do laudo técnico emitido pela própria refinaria de origem (REPLAN, 2018).

As fibras de sisal utilizadas foram fornecidas pela empresa SISALSUL de São Paulo/SP, em fardos de fios alongados com 1,00 kg cada. O processo de caracterização física dessas fibras foi realizado no Laboratório de Caracterização Microestrutural (LACAMI) do Centro Tecnológico SATC, em Criciúma/SC, onde foram realizados os ensaios de microscopia eletrônica de varredura (MEV), espectroscopia por fluorescência de Raio-X (FRX), difratometria de Raio-X (DRX), espectroscopia infravermelha por transformada de Fourier (FTIR), termogravimetria (TGA) e calorimetria diferencial (DSC).

1.4 DELIMITAÇÕES DO ESPAÇO DA PESQUISA

Esta pesquisa é de cunho teórico e experimental, desenvolvida exclusivamente em âmbito laboratorial. Logo, não fez parte dos objetivos propostos a execução de trabalhos em campo de qualquer das etapas supramencionadas no tópico 1.3.

Os procedimentos laboratoriais compreenderam três locais distintos:

- Os ensaios de microscopia eletrônica de varredura (MEV), espectroscopia por fluorescência de Raio-X (FRX), difratometria de Raio-X (DRX), termogravimetria (TGA) e calorimetria diferencial (DSC), e espectroscopia infravermelha por transformada de Fourier (FTIR), para caracterização das fibras de sisal, foram realizados no Laboratório de Caracterização Microestrutural (LACAMI) do Centro Tecnológico SATC, em Criciúma/SC;
- O processo de seleção e preparo de todos os materiais, usinagem, moldagem, e compactação de todos os corpos de prova e placas utilizadas nos ensaios, foi realizado no LDTPav da UFSC, no Centro Tecnológico de Joinville/SC, onde também foram realizados os ensaios de Prensa de Compactação Giratória (PCG) e Duriez a 18 °C;

- O ensaio de deformação permanente a 60 °C foi realizado no LabPav da UFSC, em Florianópolis/SC.

Corroborar-se a isto que todas as análises realizadas são válidas apenas para as condições estabelecidas nesta pesquisa.

1.5 JUSTIFICATIVA: RELEVÂNCIA DO TEMA

De todos os modais de transporte disponíveis no Brasil, o rodoviário é, com grande margem, o mais utilizado em todos os segmentos e regiões. Entretanto, apesar da representatividade e importância deste modal no país, grande parte das rodovias brasileiras apresentam, na maioria das situações, problemas funcionais e estruturais severos antes mesmo de atingir a vida útil de projeto (MINISTÉRIO DA INFRAESTRUTURA, 2022).

Além de problemas executivos enfrentados em razão do baixo rigor técnico aplicado, diversos aspectos relacionados à metodologia de formulação de misturas asfálticas adotada no Brasil corroboram para a baixa qualidade das estruturas de pavimentos no país, que incluem desde o processo de seleção dos materiais, até o arcabouço teórico que sustenta a concepção metodológica atualmente aplicada no país (ROCHA; FERREIRA; BORBA, 2019)

Destaca-se também que no Brasil, o conceito de faixa granulométrica é largamente utilizado na produção de misturas asfálticas. Contudo, as referidas faixas possuem uma amplitude exacerbada nos limites percentuais normativos, além do uso de frações comerciais heterogêneas, situações que não raro ocasionam diversos funcionais e estruturais, minorando a vida útil das misturas asfálticas em serviço (OLIVEIRA, 2019).

Concomitante a este cenário, fatores como o forte apelo ecológico e sustentável, cada vez mais crescentes (XU *et al.*, 2022; DYER; LIMA, 2022), e as preocupações com a necessidade de uso racional de derivados do petróleo nas próximas décadas (DALHEIMER; HERWARTZ; LANGE, 2021; GAUDENZI *et al.*, 2023), têm corroborado à elaboração de pesquisas que visam analisar um melhor aproveitamento das características de misturas asfálticas, e, não obstante, a utilização de materiais renováveis ou reconicionados para isso, situação em que esta pesquisa se enquadra.

A utilização de fibras de sisal é, em amplo aspecto, benéfica para o contexto brasileiro, uma vez que o Brasil é, atualmente, um dos maiores exportadores deste insumo no mundo, com

produção anual na ordem de 120.000 toneladas (FAO, 2023). Além disso, o cultivo, a manufatura e comercialização de sisal constituem a principal fonte de renda de uma das regiões mais desassistidas do país, o denominado “Território do Sisal”, localizado do semiárido nordeste baiano (EMBRAPA, 2021b).

Isto posto, fica evidente a preponderância do fomento à utilização do sisal e seus subprodutos para a solidificação da cadeia de produção deste insumo, e, conseqüentemente, trazer vantagem financeira para as famílias da região que dependem majoritariamente desta atividade para sua subsistência, além de, notadamente, ser também uma ferramenta de incentivo para a melhoria dos processos de controle tecnológico deste material, como no processo de formulação de misturas asfálticas.

1.6 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Este trabalho está organizado da seguinte forma:

Capítulo 1: Apresenta uma introdução ao tema estudado, inteirando o leitor acerca do contexto da pesquisa e dos objetivos pretendidos.

Capítulo 2: Aborda um panorama geral sobre misturas asfálticas no contexto da metodologia francesa, dando ênfase para misturas asfálticas densas, do tipo BBSG.

Capítulo 3: Trata das principais características das fibras do sisal, desde seu processo de concepção, até o contexto econômico e científico que se interrelaciona com este produto.

Capítulo 4: Apresenta a caracterização dos materiais utilizados na pesquisa, bem como a descrição da metodologia de ensaios adotados na campanha experimental.

Capítulo 5: Expõe os resultados obtidos, comparando com os valores de referência normativos, bem como aborda as respectivas discussões e justificativas relacionadas.

Capítulo 6: Discorre sobre as conclusões da pesquisa, e apresenta sugestões para trabalhos futuros.

CAPÍTULO 2

ESTRUTURAS DE PAVIMENTO E MISTURAS ASFÁLTICAS

Este capítulo apresenta considerações e conceitos gerais sobre estruturas de pavimento e misturas asfálticas, dando ênfase para formulações do tipo BBSG, enfoque desta pesquisa.

2.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

Pavimento pode ser definido como uma estrutura constituída a partir da superposição de camadas com espessuras distintas e finitas, compostas de materiais com diferentes resistências e deformações, dispostas sobre o terreno de fundação, considerado semi-infinito (SELSAL; KARAKAS; SAYIN, 2022; CHU *et al.*, 2023).

Os pavimentos asfálticos, quanto estrutura, se diferem de grande parte de outros elementos projetados no contexto da engenharia em razão da natureza das solicitações a que são submetidos: enquanto grande parte das estruturas convencionais da construção civil são submetidas a esforços estáticos e contínuos, os pavimentos são solicitados por esforços dinâmicos, itinerantes e intermitentes, em razão da natureza do tráfego de veículos sobre eles (NIAN *et al.*, 2023).

Desta forma, uma estrutura de pavimento deve ser projetada e dimensionada de forma tal que as tensões impostas pelo tráfego sejam progressivamente dissipadas por cada uma das camadas, até chegar no terreno de fundação em um valor admissível por este (ALZIOUD; ABBAS; HUANG, 2022; CHEN *et al.*, 2022).

Um bom pavimento também deve garantir condições de trafegabilidade e segurança para os usuários ao longo de toda a vida útil de projeto, resistindo a esforços diversos, oriundos tanto do tráfego solicitante, principalmente o acúmulo de deformações ao longo da vida útil e solicitação à fadiga, quanto de fatores externos, como intemperismo, ação ambiental, incidentes do tráfego, exposição a produtos ou materiais abrasivos ou oxidativos, entre outras situações (JIANG *et al.*, 2022; GUO *et al.*, 2023; ZHANG; CAO; ZHANG, 2023).

Diversas metodologias de formulação de misturas asfálticas foram desenvolvidas no mundo, sempre buscando encontrar a melhor relação entre a tríade de parâmetros básicos visados em projetos de pavimentação rodoviária: conforto, segurança e economia. Neste contexto, destaca-se a metodologia francesa de formulação de misturas asfálticas, desenvolvida

pelo LCPC ao longo das últimas 6 décadas (IFSTTAR, 2020; SILVA; CORREIA; SOUSA, 2021), sendo objeto de enfoque dos tópicos a seguir, haja vista a abordagem experimental adotada nesta pesquisa.

2.2 TIPOS DE ESTRUTURAS DE PAVIMENTO E DE MISTURAS ASFÁLTICAS NA METODOLOGIA FRANCESA

Os princípios da metodologia francesa de formulação de misturas asfálticas datam da década de 1950, e têm consolidado notório e progressivo reconhecimento da comunidade científica, por ser a única metodologia no mundo com um método racional de formulação, apresentando também os mais refinados parâmetros de relação campo-laboratório atualmente (IFSTTAR, 2020).

No contexto desta metodologia, a concepção e projeto do pavimento, quanto estrutura, está diretamente relacionada à natureza do tráfego solicitante, às características específicas dos materiais constituintes de todas as camadas do pavimento e suas interações, além de aspectos externos, como condição ambiental e intemperismo, particularizando a estrutura projetada para cada conjunto de condições previamente determinadas e estudadas (MANUEL LPC, 2007).

A estrutura do pavimento projetado também é atrelada ao tipo de via e à classe de tráfego a que será destinado. Desta forma, a malha viária francesa é referencialmente dividida em dois grupos: a rede estruturante (VRS) e a rede não estruturantes (VRNS) (LCPC, 2005).

A partir de uma determinação do Ministério de Equipamentos de Transporte e Habitação francês de 1998, definiu-se que a rede estruturante abrangeria as vias com o maior nível de tráfego do país, contemplando vias rápidas urbanas (VRU), rodovias não concedidas (ARNC), ligações que asseguram a continuidade da rede rodoviária (LACRA), e grandes ligações de ordenamento do território (GLAT). As demais rodovias de ligações de ordenamento de território (GLAT) e vias nacionais que não fazem parte das categorias mencionadas anteriormente constituem a rede não estruturante (MINISTÈRE DE L'EQUIPEMENT, DES TRANSPORTS ET DU LOGEMENT, 1998).

Todas as rodovias da rede estruturante são dimensionadas para um período de projeto de, no mínimo, 30 anos, enquanto as rodovias da rede não estruturante, para um período de projeto de 20 anos (MANUEL LPC, 2007).

Quanto à classificação do tráfego, são definidas oito classes distintas, abrangendo, progressivamente, desde a condição mais sutil até a mais crítica de fluxo de veículos, conforme apresentado na Tabela 2.1.

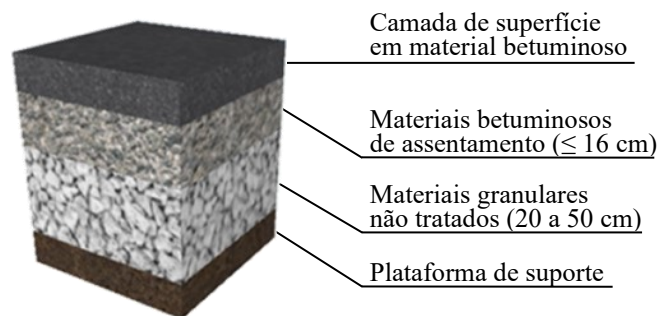
Tabela 2.1– Classes de tráfego de acordo com a metodologia francesa.

Classe	T5	T4 (TC2)	T3 (TC3)		T2 (TC4)		T1 (TC5)		T0 (TC6)		TS (TC7)		TEX (TC8)
			T3- T3+	T2- T2+	T1- T1+	T0- T0+	TS- TS+						
VMDA	0	25	50	85	150	200	300	500	750	1200	2000	3000	≥ 5000
	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	
	25	50	85	150	200	300	500	750	1200	2000	3000	5000	

Fonte: Adaptado de LCPC (1994).

Para rodovias da rede não estruturante (VRNS) cujo tráfego seja inferior a TC6(T0), projetam-se pavimentos do tipo flexível (*chaussée souple*) em cuja estrutura utilizam-se materiais granulares não tratados apenas a partir da sub-base, ou na base somente quando tráfego inferior a TC3(T3), sendo exigido que as demais camadas superiores sejam betuminosas, isto é, materiais betuminosos de assentamento e misturas asfálticas de caráter estrutural e funcional (CIMBETON, 2019). A Figura 2.1 apresenta uma seção esquemática de um pavimento do tipo *chaussée souple*.

Figura 2.1 – Seção esquemática de um pavimento do tipo *chaussée souple*.

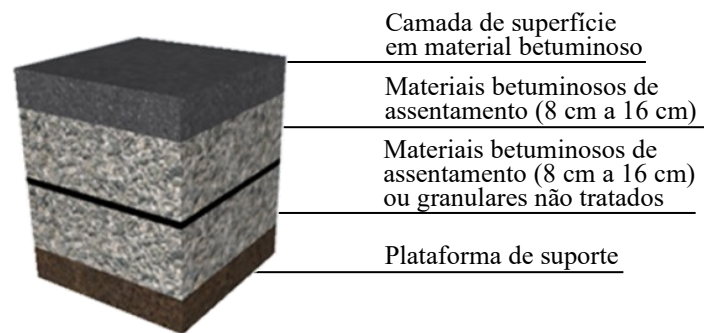


Fonte: Adaptado de LCPC (1994).

Para qualquer via da rede estruturante (VRS) ou até mesmo vias da rede não estruturante (VRNS) com classe de tráfego superior ou igual a TC6(T0), projetam-se pavimentos do tipo betuminosos espessos (*chaussée bitumineuse épaisse*), em cuja estrutura geralmente são empregados materiais betuminosos de assentamento até a camada de sub-base, podendo, somente em casos específicos, utilizar materiais granulares não tratados a partir da

sub-base apenas. Tal qual nos pavimentos do tipo *chaussée souple*, as camadas de rolamento e até de transição (quando existente) são compostas de misturas asfálticas de caráter estrutural e funcional (BOURSICAUD, 2018). A Figura 2.2 apresenta uma seção esquemática de um pavimento do tipo *chaussées bitumineuses épaisses*.

Figura 2.2 – Seção esquemática de um pavimento do tipo *chaussée bitumineuse épaisse*.



Fonte: Adaptado de LCPC (1994).

As camadas de granulares e o terreno natural (plataforma de suporte) constituem-se de materiais de origem mineral, com capacidade de suporte e propriedades físicas previamente conhecidas em projeto, e passam por processos de regularização (terraplenagem) e compactação (LCPC, 1994).

As camadas betuminosas, isto é, materiais de assentamento e camadas superficiais, recebem especial destaque na metodologia francesa, pois é preponderante que atendam a requisitos específicos no que se refere a propriedades mecânicas e funcionais (MANUEL LPC, 2007). O tópico 2.2.1 aborda de maneira mais abrangente estes aspectos.

2.2.1 Aspectos gerais sobre misturas asfálticas

As misturas de concreto asfáltico que constituem as camadas betuminosas das estruturas de pavimento são materiais compósitos produzidos através da usinagem de partículas granulares, materiais de enchimento (eventualmente) e um ligante betuminoso derivado de petróleo (LI, Y. *et al.*, 2022; SAKTHIVEL; KATHURIA; SINGH, 2022).

O processo de usinagem destes materiais ocorre a altas temperaturas em razão da suscetibilidade térmica do ligante betuminoso, que torna-se mais fluido progressivamente ao aumento de temperatura, viabilizando a trabalhabilidade da mistura. Tal temperatura é definida

previamente com base na curva de viscosidade do ligante, e controlada durante todo o processo (PESSOA JR., 2019).

Uma vez usinada e tendo atingido a temperatura de compactação definida em projeto, a mistura asfáltica é aplicada em campo e compactada mecanicamente, processo que lhe confere aspectos muito específicos do ponto de vista mecânico e funcional (LCPC, 2014), conforme denota os tópicos 2.2.1.1 e 2.2.1.2.

2.2.1.1 Mecânicos

O processo de compactação da mistura asfáltica lhe confere um determinado volume de vazios, que deve respeitar aos parâmetros previamente estabelecidos em projeto, e que estão diretamente relacionados ao comportamento mecânico desta (FANG *et al.*, 2022).

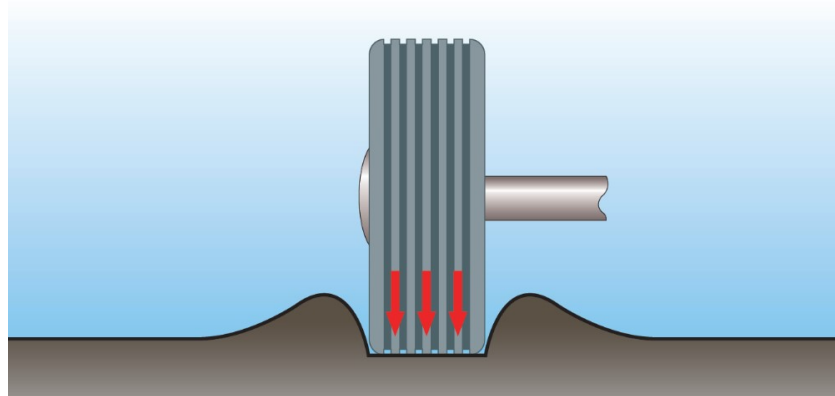
Em razão da ação fundamental do ligante betuminoso no processo de aglutinação dos elementos da mistura asfáltica, ocorre que, por consequência, a mistura herda características do ligante betuminoso que a compõe. Ressalta-se, contudo, que os ligantes betuminosos apresentam comportamento viscoelástico que varia em função da temperatura, em que, quanto menor for a temperatura, mais predominante se apresenta a ação do comportamento elástico, e quanto maior for a temperatura, mais predominante se mostra a ação da componente viscosa, contudo, nunca deixando de apresentar frações destas duas componentes simultaneamente (AYASRAH *et al.*, 2023).

De maneira geral, a temperatura de trabalho das misturas asfálticas se situa em uma faixa intermediária a estes extremos, e por conseguinte, não ocorre grande predominância de uma destas componentes em detrimento de outra, levando as misturas asfálticas a desempenharem um comportamento mecânico viscoelástico, que se mostra variável conforme ocorre alteração de temperatura e da frequência de aplicação do carregamento (SHAMSAEI; CARTER; VAILLANCOURT, 2022).

Outra característica herdada do ligante betuminoso é a fluência nas misturas asfálticas: com a aplicação de carregamento, o arranjo granular da mistura torna-se suscetível a alterações (modificação da angularidade, desarranjo granular, desestabilização) tanto quanto maior for a temperatura e o percentual de ligante betuminoso presente na composição, em razão do afloramento da componente viscosa do ligante e consequente redução da característica elástica, conduzindo a um acúmulo gradual de microdeformações ao longo do tempo (LI, J. *et al.*, 2022).

Este processo é um dos precursores do fenômeno de deformação permanente das misturas asfálticas, que resulta em diversas patologias visualmente identificáveis e que prejudicam o conforto e trafegabilidade do usuário, sobretudo como a formação de afundamentos na trilha de roda (CIMBETON, 2019). A Figura 2.3 apresenta de maneira esquemática e ampliada essa condição.

Figura 2.3 – Desenho ampliado da deformação permanente gerada pela fluência da mistura asfáltica.



Fonte: CIMBETON (2019).

Inversamente, tem-se também que quanto menor for a temperatura, mais rígida será a mistura asfáltica, em razão do afloramento da componente elástica do ligante betuminoso presente, podendo prejudicar o comportamento mecânico do pavimento, fragilizando-o pelo excesso de rigidez, uma vez que a natureza do tráfego itinerante e intermitente solicita o pavimento alternadamente à contração e extensão, esforços cuja absorção está intrinsecamente ligada à flexibilidade da camada asfáltica (ZHANG *et al.* 2019; ZHOU *et al.*, 2019)

2.2.1.2 Funcionais

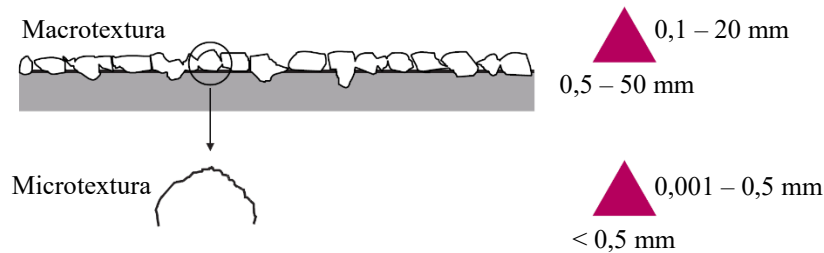
O processo de compactação da mistura asfáltica lhe confere também uma textura superficial que é composta de dois domínios: a macrotextura e a microtextura.

A macrotextura relaciona-se com o tamanho e forma dos granulares, enquanto a microtextura está relacionada com a rugosidade superficial dos grãos. Juntas, promovem a manutenção da segurança viária através da aderência pneu-pavimento, que se dá por dois fenômenos: a histerese, decorrente da deformação do pneumático quando em contato com o granular, no domínio da macrotextura, e a adesão molecular, relacionada com as forças de atrito

no contato seco do pneumático com a superfície do pavimento, no domínio da microtextura (PRANJIĆ *et al.*, 2020).

A Figura 2.4 demonstra esquematicamente os domínios da microtextura e da macrotextura superficial de um pavimento, e suas respectivas amplitudes.

Figura 2.4 – Irregularidades da superfície do pavimento na escala da macrotextura e microtextura.



Fonte: LCPC (2005).

No arranjo superficial dos granulares decorrente do processo de compactação, ocorre também a formação de sulcos entre um granular e outro, denominados de curtoses, que são preponderantes no quesito de segurança viária, pois auxiliam no escoamento da lâmina de água sobre o pavimento, tanto por gravidade como por compressão da banda de rodagem do pneu. (FWA, 2021).

2.2.1.3 Classificação das misturas asfálticas

A metodologia francesa classifica as misturas asfálticas que compõem as camadas betuminosas do pavimento em dois grupos, relacionados à sua contribuição e função na estrutura do pavimento. Estes grupos contemplam diversas misturas asfálticas com características e parâmetros técnicos específicos, bem como aplicações distintas e muito bem definidas nesta metodologia (IDRRIM, 2020).

O primeiro grupo corresponde às misturas asfálticas de caráter funcional, cuja aplicação destina-se às camadas superficiais do pavimento (rolamento ou ligação) e têm por finalidade garantir condições de conforto e segurança aos usuários. Os aspectos avaliados na formulação destas misturas correspondem a parâmetros técnicos que viabilizam estas condições, como compactidade, resistência à ação da água e deformação permanente, correspondente aos níveis empíricos da metodologia francesa. Segundo Manual LPC (2007) as principais misturas que integram esse grupo são:

- Béton Bitumineux Semi-Grenus (BBSG);
- Béton Bitumineux à Module Élevé (BBME);
- Béton Bitumineux pour chaussée souples à faible trafic (BBS);
- Béton Bitumineux Mince (BBM);
- Béton Bitumineux Très Mince (BBTM);
- Béton Bitumineux Drainant (BBD_r).

O segundo grupo abrange as misturas asfálticas de caráter estrutural, cuja aplicação destina-se às camadas de base e apoio, e desempenham a função de resistir, absorver e distribuir as tensões impostas pelo tráfego de veículos. Desta forma, devem apresentar excelentes características mecânicas, sobretudo com relação à resistência à fadiga, e, portanto, são avaliadas até os níveis fundamentais da metodologia francesa. As principais misturas que integram esse grupo, segundo Manuel LPC (2007), são:

- Enrobé Bitumineux Grave-Bitume Empirique (EB-GB);
- Enrobé Bitumineux Grave-Bitume (EB-GB);
- Enrobé Bitumineux – Enrobé à Module Élevé (EB-EME).

A metodologia francesa apresenta pontos de controle que permitem verificar o enquadramento de uma dada composição granulométrica a estas classes de mistura asfáltica. Similar a trabalhos como os de Siroma (2018), Clara (2020) e Persike (2023), a formulação proposta nesta pesquisa teve sua composição granulométrica calculada pelo método racional, através da Equação de *Füller-Talbot* (4.1 e 4.2), enquadrando-se nos pontos de controle de graduação para misturas do tipo BBSG, objeto de enfoque do tópico a seguir

➤ Béton Bitumineux Semi-Grenus (BBSG)

As misturas asfálticas do tipo *Béton Bitumineux Semi-Grenus* (BBSG) apresentam uma composição granulométrica densa e contínua, e são destinadas à aplicação em camadas de rolagem e ligação, com espessuras que variam de 5,0 cm a 9,0 cm. Devido estarem relacionadas ao aspecto funcional do pavimento, são avaliadas quanto à habilidade de compactação, resistência à ação da água e deformação permanente (MANUEL LPC, 2007).

Na metodologia francesa, existem duas graduações admitidas para essa classe de mistura: 0/10 mm e 0/14 mm, sendo os últimos valores referentes ao diâmetro máximo dos granulares. Foi adotada para esta pesquisa a graduação correspondente a 0/14 mm, pois está mais próxima do diâmetro máximo de 12,7 mm da curva teórica calculada através da Equação de Föhler-Talbot (4.1 e 4.2).

A Tabela 2.2 apresenta os pontos de controle em relação à percentagem passante de algumas aberturas de peneiras para BBSG, conforme definido por Manuel LPC (2007).

Tabela 2.2 – Pontos de controle da composição granulométrica da mistura tipo BBSG 0/14 mm.

Abertura (mm)	Percentagem Passante (%)		
	Limite mínimo	Pontos visados	Limite máximo
14,0	90,00	97,00	100,00
10,0	-	78,00	-
6,3	47,00	52,00	58,00
4,0	-	47,00	-
2,0	25,00	31,00	35,00
0,63	6,30	6,7	7,20

Fonte: Manuel LPC (2007).

A metodologia francesa utiliza o conceito de faixa granulométrica, pois os pontos de controle apresentados acima permitem um controle preciso da composição granulométrica da mistura projetada, através de frações homogêneas de cada um dos diâmetros de granulares desejados. Fica a critério do projetista adicionar mais diâmetros de peneiras além destes, a fim de preencher pontualmente a curva granulométrica projetada. Para esta pesquisa foram adotadas as peneiras de abertura 12,7 mm, 9,5 mm, 6,3 mm, 4,76 mm, 2,2 mm, 1,2 mm, 0,6 mm, 0,3 mm, 0,15 mm e 0,075 mm

Os procedimentos de cálculo da composição granulométrica e separação dos materiais estão descritos no capítulo 4 desta pesquisa.

CAPÍTULO 3

FIBRAS DE SISAL

Este capítulo apresenta os principais conceitos e definições sobre fibras de sisal, abrangendo os aspectos técnicos e econômicos deste material, dando ênfase para o seu contexto de incorporação em misturas de concreto asfáltico.

3.1 ASPECTOS GERAIS E RELEVÂNCIA SOCIOECONÔMICA

O sisal é uma fibra vegetal obtida através da planta *Agave Sisalana* ou suas versões híbridas, originária do México, que teve seu cultivo estendido a diversos outros países em razão da fácil adaptação a locais de clima tropical e seco, sendo atualmente uma das fibras vegetais mais produzidas no mundo (INFO, 2023).

A Figura 3.1 mostra um feixe de fios de sisal já beneficiados, uma das formas de comercialização mais comumente encontradas.

Figura 3.1 – Fibra de sisal.



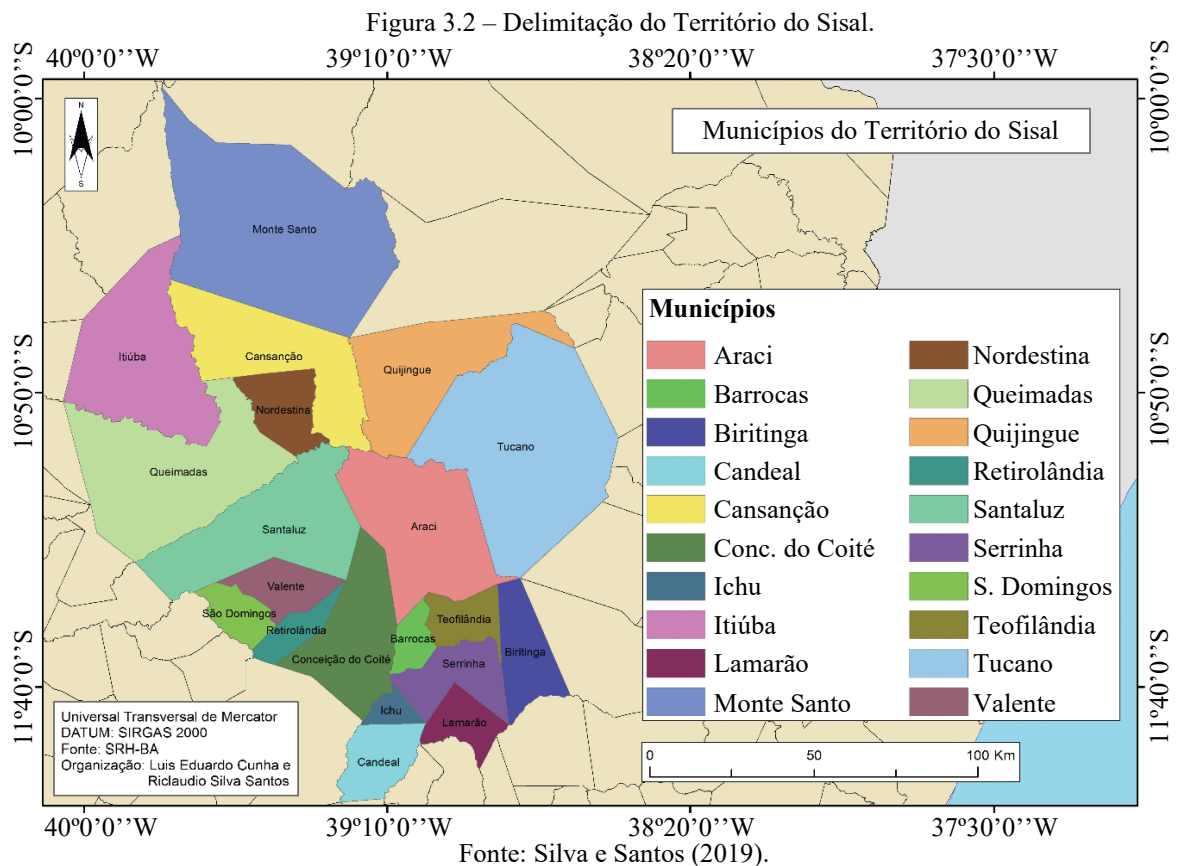
Fonte: M. & W. Heller (2022).

A *Food and Agriculture Organization of the United Nations* (FAO) estima que a produção mundial desse insumo seja de 300.000 toneladas anualmente, movimentando aproximadamente 75 milhões de dólares. Dentre os principais países produtores, destacam-se Brasil, Angola, Cuba, Haiti, Indonésia, Quênia, Madagascar, Moçambique, México, África do

Sul, Tanzânia e Tailândia, sendo o Brasil responsável por mais de 40 % de toda a produção mundial desta fibra, aproximadamente 120.000 toneladas por ano, das quais, mais de 80 % destinam-se à exportação (FAO, 2023).

O cultivo de sisal no Brasil começou no início do século XX, na região da Bahia e da Paraíba. Com o advento da Segunda Guerra Mundial e a necessidade do mercado mundial em produzir roupas e artigos têxteis, a demanda por esse insumo aumentou, e o cultivo desta planta se expandiu para outros estados, como Rio Grande do Norte e Ceará (SOARES; ARRUDA; AMARANTE, 2022).

Contudo, ainda hoje o estado da Bahia responde como maior produtor nacional deste material, concentrando cerca de 90 % de todo o montante produzido no país (EMBRAPA, 2021a), sobretudo no denominado Território do Sisal, região composta por 20 municípios do semiárido baiano, que abrange uma área de aproximadamente de 20.000 km², onde residem mais de 500.000 pessoas cuja fonte de renda está majoritariamente atrelada ao cultivo, produção, beneficiamento e comercialização do sisal, direta ou indiretamente (SILVA; SANTOS, 2019; EMBRAPA, 2021c). A Figura 3.2 apresenta a localização geográfica do Território do Sisal.



Verifica-se, neste contexto, que cultivo do sisal exprime forte relevância socioeconômica no nordeste brasileiro, sendo um dos fatores preponderantes para a fixação da população nesta região, e conseqüentemente seu desenvolvimento econômico (CARDOSO, 2019)

As fibras provenientes do sisal são comercializadas sob várias formas, desde fios curtos, cordas, cordões, barbantes, palhas, fibras alongadas, e até mesmo folhas inteiras de tecido tramado (SISALSUL, 2023).

As diversas formas comerciais que as fibras assumem estão relacionadas com o processo de cultivo e beneficiamento da *Agave Sisalana* ou suas versões híbridas, assunto descrito de forma mais abrangente no tópico a seguir.

3.2 NOÇÕES GERAIS DO PROCESSO DE OBTENÇÃO DA FIBRA

O cultivo de sisal no Brasil concentra-se em dois genótipos da planta, a *Agave Sisalana*, que compreende a maior parte dos espécimes cultivados no país, e o Sisal híbrido 11648, cultivado em algumas regiões do Rio Grande do Norte e da Paraíba (QUINTANILHA-PEIXOTO *et al.*, 2021). O plantio de ambos ocorre a partir de pequenos rebentos bulbares que são produzidos no centro do corpo folhal da planta (AGRIC POINT, 2021). A Figura 3.3 apresenta duas lavouras com cada um destes espécimes.

Figura 3.3 – Detalhe de uma lavoura com (a) *Agave Sisalana* e (b) *Agave* híbrido 11648.



(a)



(b)

Fonte: Adaptado de Silva (2021a).

A Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA) cita que existem diferenças significativas entre esses dois genótipos:

O comprimento da folha e a resistência da fibra, características importantes para a indústria, são qualidades intrínsecas de *A. sisalana*. O híbrido 11648, entretanto, é mais resistente à seca, o que permite colheita durante todo o ano. No processo de desfibramento, o híbrido 11648, quando comparado a *A. sisalana*, tem a desvantagem de exigir maior esforço do operador da máquina desfibradora; esta desvantagem, no entanto, pode ser superada com o uso de máquinas desfibradoras automáticas. Dessa forma, ao escolher o genótipo a ser plantado, o agricultor deverá levar em consideração a disponibilidade do clone em sua região, os critérios de qualidade da fibra exigidos pela indústria e o tipo de máquina desfibradora existente na propriedade (EMBRAPA, 2021d).

Apesar de ser cultivado no Brasil há mais de um século, o processo de beneficiamento do sisal pós-colheita ainda é majoritariamente artesanal, realizado diretamente nas propriedades onde os espécimes são cultivados, ou a pequenas distâncias em locais associados ou cooperativas, através de processos muito artesanais e ainda pouco tecnológicos. Isso corrobora para que o genótipo *Agave Sisalana* seja o mais cultivado no país (CAVALCANTE; ALMEIDA, 2022).

A primeira colheita de folhas ocorre a partir do segundo ano após o plantio, e o ciclo de vida da *Agave Sisalana* é de aproximadamente 12 anos, período em que cada espécime é capaz de produzir de 180 a 240 folhas, dependendo das condições de localização, altitude, pluviosidade e tipo de genótipo escolhido (FAO, 2023).

O processo de beneficiamento do sisal inicia com o corte (colheita) das folhas, que é realizado manualmente, com auxílio de uma foice ou facão pelo trabalhador (Figura 3.4). (VISÃO AGRO, 2022).

Figura 3.4 – Processo de colheita das folhas de sisal.



Fonte: Sisal Rugs (2016).

Após o corte, as folhas passam pelo processo de desfibramento, que é a principal etapa do beneficiamento. A folha do sisal possui uma polpa composta de seiva que envolve as fibras. O desfibramento consiste em uma raspagem mecânica longitudinal que elimina a seiva e a polpa folhal, deixando apenas a fibra, que corresponde a aproximadamente 4% do peso total da folha, apenas. O equipamento utilizado é popularmente conhecido como “motor de agave” ou “máquina paraibana” (Figura 3.5) (MELO, 2022).

Figura 3.5 – (a) Máquina desfibradora paraibana em operação e (b) detalhe do rotor de raspagem.



Fonte: Adaptado de Silva (2022).

O processo subsequente ao desfibramento é a lavagem, onde as fibras ainda úmidas recém-saídas do desfibrador são transportadas até tanques com água limpa, onde ficam imersas de 8 a 12 horas, a fim de eliminar os resíduos de mucilagem e seiva que ainda permanecem aderidos às fibras (Figura 3.6). A água utilizada nesse processo deve ser limpa, pois a natureza higroscópica do sisal pode absorver eventuais substâncias presentes na água, o que pode alterar a qualidade e coloração da fibra (EMBRAPA, 2021d).

Figura 3.6 – Imersão da fibra de sisal em tanque com água para retirada de impurezas.



Fonte: Silva (2021b).

Após a lavagem, as folhas são penduradas em varais, e ficam expostas ao sol de 8 a 10 horas, para evaporação da água da lavagem e da maior parte do teor de umidade presente na própria fibra, processo que resulta na mudança de coloração das fibras, de verde claro para bege (Figura 3.7) (EMBRAPA, 2021e).

Figura 3.7 – Fibras de sisal estendidas para secagem ao sol: em primeiro plano fibras recém-estendidas, e ao fundo, fibras em estágio mais avançado de secagem.



Fonte: Silva (2021b).

Concluído o processo de secagem, a fibra beneficiada deve apresentar, segundo a Portaria n.º 71, de 16 de março de 1983, um teor máximo de 13,5 % de umidade, podendo então ser prensada e enfardada, para a comercialização (BRASIL, 1983).

Além destas etapas de beneficiamento, as fibras podem passar por outros processos industriais de pós-tratamento, a fim de que adquiram propriedades de interesse à utilização pretendida, como estabilização térmica com dióxido de titânio (TiO₂), amplamente utilizado para garantir proteção dos fios à ação ultravioleta e intempéries (RADETIĆ, 2013). Porém, nem todas as fibras disponíveis no mercado apresentam deste tipo de tratamento secundário.

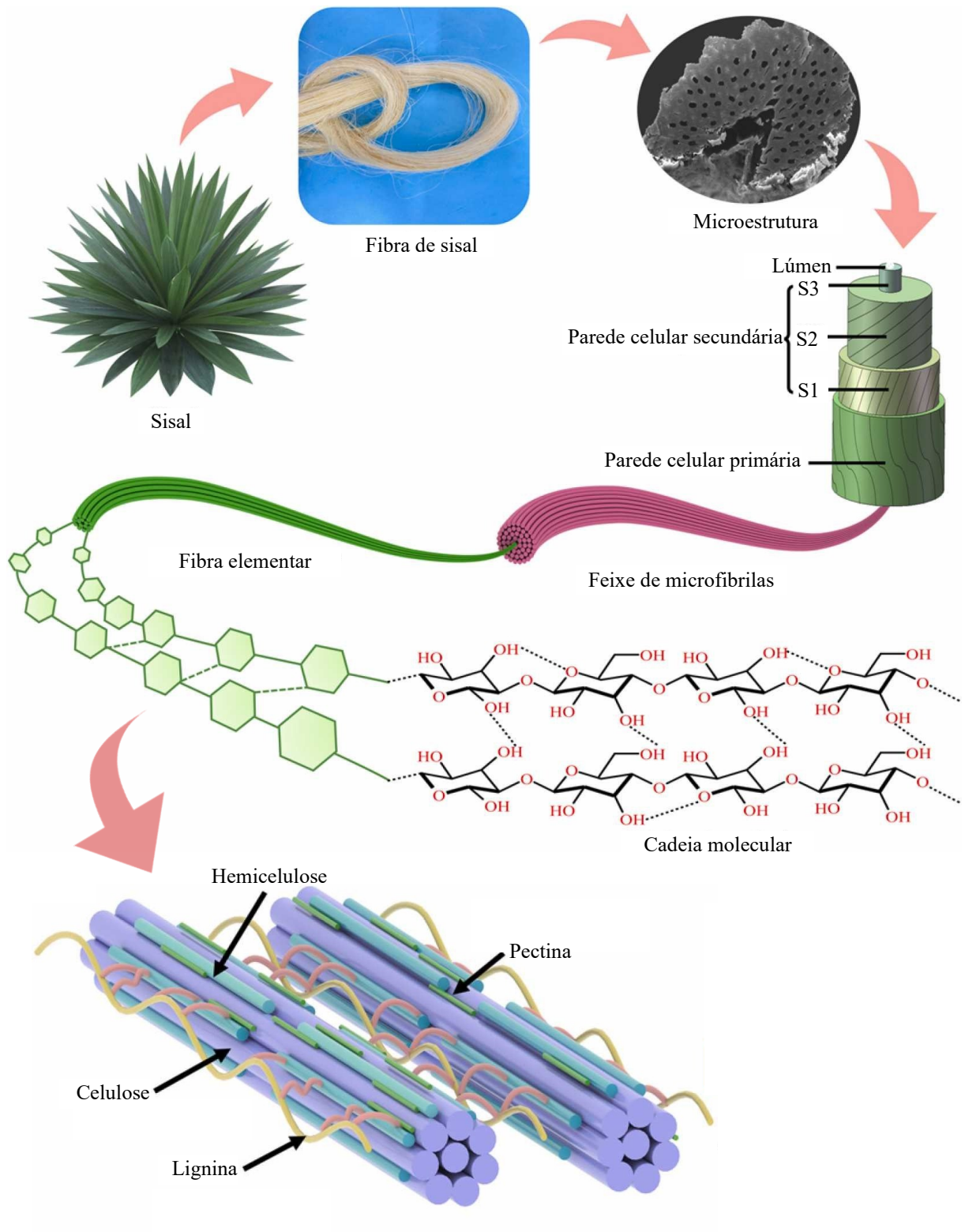
3.3 CARACTERÍSTICAS E PROPRIEDADES FÍSICAS DA FIBRA

As fibras do sisal, tal qual grande parte das fibras vegetais orgânicas, apresentam uma estrutura complexa. Manian, Cordin e Pham (2021) apontam que esse tipo de fibra é composta de microfibrilas organizadas em um sistema multicamadas, formando uma estrutura alongada e reforçada, contendo um canal central no interior da microestrutura, denominado lúmen. Essa estrutura multicamadas é organizada da seguinte maneira:

- Parede celular primária: a mais externa, com estrutura reticulada, composta de celulose;
- Parede celular secundária: interna à parede primária, apresenta três camadas, denominadas S1, S2 e S3, na direção da parede primária para o lúmen:
 - Camada S1: imediatamente interna à parede primária, também de estrutura reticulada, composta por celulose, hemicelulose, pectina e lignina;
 - Camadas S2 e S3: imediatamente internas à camada S1, apresentam estrutura em arranjo espiral, compostas por celulose, hemicelulose e pectina.

A Figura 3.8 esquematiza esses elementos, apresentando a organização estrutural de uma fibra de sisal.

Figura 3.8 – Organização estrutural multiescala de uma fibra de sisal.



Fonte: Adaptado de Yao *et al.* (2023).

Da Figura 3.8 depreende-se que boa parte da estrutura das microfibrilas é constituída por celulose e hemicelulose, além de lignina e pectina, motivo pelo qual estas fibras comumente são denominadas de lignocelulósicas (DIAS *et al.*, 2023). A Tabela 3.1 dá uma noção do quão representativo cada um destes elementos se mostra na composição.

Tabela 3.1 – Características químicas da fibra de sisal.

Propriedade	Valor
Celulose (%)	66 – 78
Hemicelulose (%)	10 – 14
Lignina (%)	10 – 14
Pectina (%)	10

Fonte: Adaptado de Singh *et al.* (2021).

A celulose, que compõe a maior parte da estrutura das microfibrilas, constitui-se de uma cadeia linear de várias unidades de celobiose, que tende a criar ligações de hidrogênio inter e intracelularmente, formando cristais insolúveis em água, característica responsável por grande parte da resistência mecânica da fibra, bem como sua resistência à água, inclusive no processo de lavagem por imersão (Figura 3.6) (CIESIELSKI *et al.*, 2020; MANIAN, CORDIN E PHAM, 2021).

A hemicelulose é composta de heteropolissacarídeos ramificados, dispostos em cadeias lineares, que possuem forte atração às cadeias de celulose, e conferem flexibilidade às cadeias cristalinas celulósicas, enquanto a lignina e a pectina associam-se formando uma matriz amorfa de estrutura tridimensional, que gera um efeito pozolânico e aglutinante, conferindo rigidez e estabilidade à estrutura (ZHANG *et al.*, 2023).

Este arranjo possibilita que as fibras de sisal apresentem algumas características mecânicas que são de especial interesse para algumas áreas de estudo, o que tem levado diversos segmentos da indústria e ciência a voltarem suas atenções para possíveis formas de utilização destas fibras. A Tabela 3.2 sintetiza algumas propriedades.

Tabela 3.2 – Características físicas da fibra de sisal.

Propriedade	Valor
Densidade (gm/cm ³)	1,5
Alongamento (%)	2,0 – 2,5
Resistência à tração (MPa)	511 – 635
Módulo de Young (MPa)	9,4 – 2,0

Fonte: Singh *et al.* (2021).

Neste contexto, têm surgido estudos visando analisar a viabilidade de utilização de fibras de sisal em misturas asfálticas. O tópico a seguir discorre sobre algumas destas experiências relatadas na literatura científica.

3.4 UTILIZAÇÃO DE FIBRAS DE SISAL EM MISTURAS ASFÁLTICAS

A literatura tem apresentado resultados promissores no que se refere à incorporação de fibras vegetais, inclusive as de sisal, em misturas asfálticas. Alguns dos trabalhos que serviram como referência para a construção da proposta experimental desta pesquisa são descritos a seguir.

Sousa *et al.* (2017) analisaram a incorporação de fibras de sisal em uma mistura asfáltica do tipo *Stone Matrix Asphalt* (SMA) com 6,2 % de CAP 50/70, dosada através do método Superpave. As fibras de sisal foram incorporadas à mistura nos comprimentos de 10 mm, 15 mm e 20 mm, e nas proporções de 0,3 % e 0,5 %. O trabalho não indicou em relação a que parâmetro o percentual de sisal foi calculado, e nem o procedimento de incorporação das fibras à mistura. Os ensaios realizados foram de escoamento do ligante (AASHTO T 305, 1997), estabilidade Marshall (DNER-ME 043, 1995), resistência à tração por compressão diametral (DNIT-ME 136, 2018), módulo de resiliência (DNIT-ME 135, 2018), dano por umidade induzida (AASHTO T 283, 2014) e Flow Number (AASHTO TP 79, 2015). As principais conclusões e resultados apontados foram:

- A trabalhabilidade da mistura se tornou dificultada em razão da incorporação das fibras, que absorvem ligante, e dificultam o processo de usinagem;
- A utilização de fibras nos tamanhos de 10 mm e 15 mm apresentou melhores resultados do que as fibras com 20 mm na trabalhabilidade (usinagem) e também no ensaio de escoamento do ligante;
- A adição de 0,3 % de sisal apresentou melhores resultados do que a adição de 0,5 % em todos os ensaios, exceto na tração indireta, em que a mistura com 0,5 % foi a única que apresentou resultado dentro dos limites normativos para SMA;
- A adição de 0,5 % de sisal mostrou resultados ligeiramente superiores de *Flow Number*, indicando possível vantagem sobre a mistura com 0,3 % de sisal para condições mais severas de tráfego;

- Os autores apontaram que de forma geral, a dosagem de 0,3 % de fibras de sisal apresentou modificações positivas mais significativas e relevantes nos ensaios realizados.

Ramalingam, Murugasan e Nagabhushana (2017) verificaram o comportamento de uma mistura asfáltica densa, com agregado de tamanho nominal máximo 13,2 mm, e um ligante betuminoso semelhante ao CAP 50/70, utilizada em rodovias de tráfego elevado na Índia. As fibras de sisal foram adicionadas à mistura nos comprimentos de 5 mm, 10 mm, 15 mm e 20 mm, e nas dosagens de 0,05 %, 0,1 %, 0,2 % e 0,3 % em relação ao peso de granulares, misturadas junto ao agregado aquecido, antes de adicionar o ligante. Os ensaios realizados consistiram na avaliação dos parâmetros Marshall (ASTM D6927, 2015), dano por umidade induzida (AASHTO T 283, 2014), módulo de rigidez e fadiga (EN 12697-26, 2004). As principais conclusões indicadas pelos autores foram:

- A adição de fibras de sisal em menores teores (0,05 % e 0,1 %) contribuiu positivamente nos resultados de fadiga e de resistência ao dano induzido por umidade;
- A estabilidade de todas as misturas reduziu com a incorporação das fibras de sisal, porém nenhuma ficou abaixo dos limites normativos;
- O módulo de rigidez das misturas reduziu progressivamente ao aumento do percentual de sisal incorporado, o que os autores atrelam à redução de estabilidade da mistura;
- A incorporação de sisal resultou em um acréscimo de apenas 0,5 % no custo de produção da mistura asfáltica;
- No contexto global das análises realizadas, os autores indicaram que as melhores dosagens e comprimentos de fibra de sisal foram, respectivamente, 0,05 % e 15 mm, com 5,4 % de ligante betuminoso.

Singh *et al.* (2021) também desenvolveram estudos sobre o comportamento resultante da adição de fibras de sisal em uma mistura asfáltica de graduação densa, com um ligante betuminoso 50/70 nos teores de 4 %, 4,5 %, 5 %, 5,5 % e 6 %. As fibras de sisal foram incorporadas à mistura nos comprimentos de 6 mm, 10 mm, 14 mm e 18 mm e nas dosagens de 0,4 % e 0,8 %. Os autores não relatam em relação a que parâmetro o percentual de sisal foi calculado, e nem o procedimento de incorporação das fibras no processo de usinagem. Os procedimentos laboratoriais consistiram na avaliação dos parâmetros Marshall (ASTM D6927,

2015), e complementarmente foi realizado um ensaio não-destrutivo de pulso ultrassônico. Os resultados obtidos foram comparados com uma mistura de mesma formulação, porém sem adição de fibras de sisal. As principais conclusões apontadas pelos autores foram:

- O teste de velocidade de pulso ultrassônico indicou que com a adição de fibras de sisal na mistura, os vazios foram preenchidos, e a densidade e viscosidade aumentaram;
- A adição de sisal resultou na redução da estabilidade da mistura de forma geral, para todas as combinações de teores de ligante e de sisal analisadas;
- O valor máximo de estabilidade foi alcançado com 0,4 % de sisal e fibras no tamanho de 10 mm.

Outros trabalhos, como de Kumar e Ravitheja (2019), também estudaram a incorporação de fibras vegetais de diversos espécimes em misturas asfálticas, e reportaram que resultados significativos nas principais propriedades mecânicas costumam ser observados em teores de fibra entre 0,3 % e 0,5 %.

Considerando este contexto, definiu-se que nesta pesquisa as fibras de sisal seriam incorporadas à mistura asfáltica no comprimento de 15 mm e nos teores de 0,3 % e 0,5 % em relação ao volume de mistura asfáltica.

CAPÍTULO 4

MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo apresenta a caracterização dos materiais utilizados na produção das misturas asfálticas estudadas, e descreve a metodologia experimental dos ensaios que foram realizados.

4.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

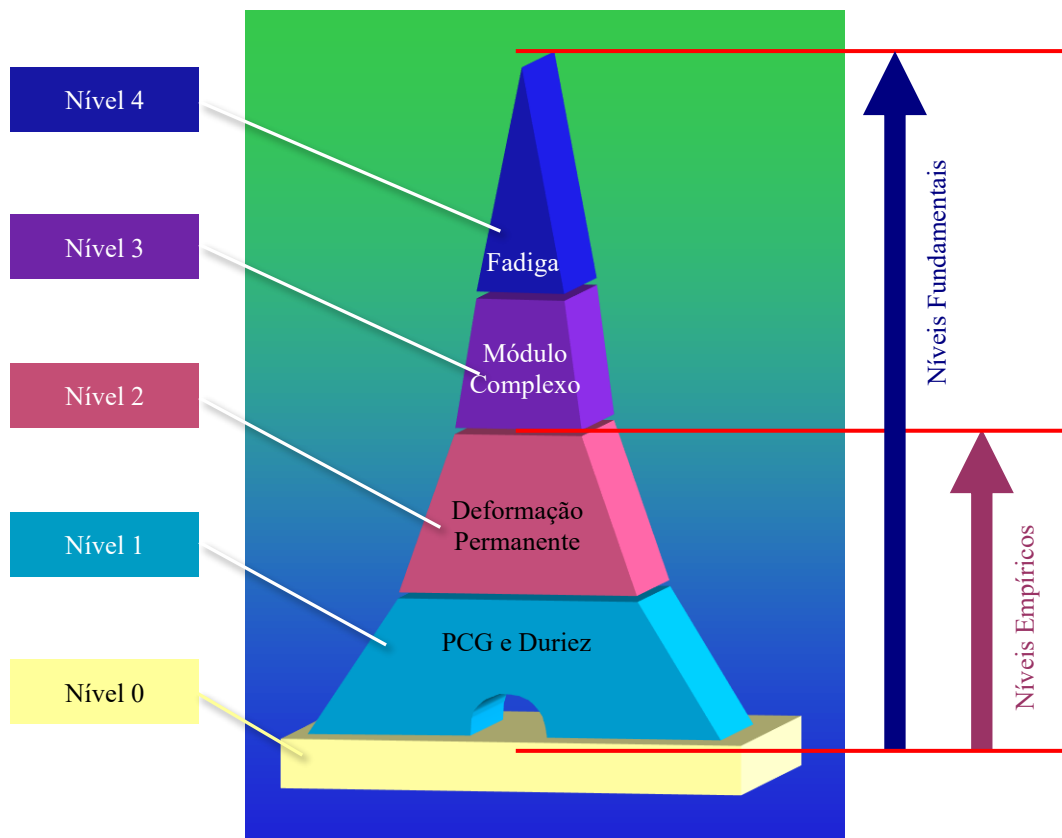
A matriz de ensaios da campanha experimental desta pesquisa seguiu os preceitos da metodologia francesa de formulação de misturas asfálticas, tanto no processo de concepção e formulação das misturas estudadas, quanto na análise e verificação dos parâmetros técnicos e critérios de aplicabilidade para as condições a que estas misturas se destinam (utilização em camadas de rolamento ou ligação).

A metodologia francesa apresenta uma sequência de ensaios de caráter eliminatório, organizados através de níveis, em que só é possível seguir para o nível subsequente se todos os requisitos do nível anterior tiverem sido atendidos. Assim, uma dada mistura asfáltica somente pode ser considerada adequada se atender a todos os requisitos de todos os níveis que lhe são aplicáveis.

Por se tratarem de etapas eliminatórias, caso a mistura analisada não atenda a todos os requisitos de um dado nível, o seu projeto precisa ser revisado, e retorna necessariamente ao nível inicial, independente do nível que tenha chegado na análise anterior (MANUEL LPC, 2007).

A Figura 4.1 apresenta a estruturação destes níveis e a forma como são denominados.

Figura 4.1 – Níveis da metodologia francesa.



Fonte: Adaptado de Manuel LPC (2007).

O nível 0 caracteriza-se pela análise das propriedades dos materiais, correspondendo ao processo de caracterização de todos os elementos que farão parte da formulação projetada. Neste nível, define-se também a composição granulométrica pretendida, de forma a enquadrá-la em uma das classes de misturas previstas pela metodologia francesa, para que se estabeleça os critérios normativos aos quais ela deve atender.

O nível 1 avalia a habilidade de compactação da mistura asfáltica na Prensa de Compactação Giratória (PCG) e a resistência à ação deletéria da água através do ensaio de Duriez a 18 °C.

O nível 2 avalia a deformação permanente da mistura asfáltica através do afundamento gerado na trilha de roda a 60 °C.

Os níveis 3 e 4 destinam-se a analisar, respectivamente, o módulo de rigidez complexo e a resistência à fadiga da mistura asfáltica projetada, sob as condições de solitação dinâmica, no domínio frequencial, e com controle do deslocamento.

A metodologia francesa classifica estes níveis em dois grupos, sendo eles: os níveis empíricos e os níveis fundamentais. Os níveis empíricos correspondem aos níveis 0, 1 e 2, e

recebem essa denominação por envolverem uma matriz de variáveis muito ampla, com fenômenos caóticos e de difícil modelagem matemática, que exigem ao pesquisador realizar experiências com base no conhecimento prévio das propriedades dos materiais e dos conceitos científicos correlatos, a fim de encontrar os melhores parâmetros para a condição analisada (do grego, *empeiria* significa experiência, experimentar).

Os níveis fundamentais compreendem os níveis 3 e 4, e abordam fenômenos já bem descritos e modelados matematicamente, de forma que viabilizam uma avaliação precisa e racional dos parâmetros analisados.

A metodologia francesa prevê que misturas de caráter funcional, como a BBSG, estudada nesta pesquisa, sejam analisadas até níveis empíricos, ou seja, até o nível 2, devido sua caracterização exclusivamente funcional na estrutura do pavimento. Misturas de caráter estrutural, como no caso das misturas projetadas para vias estruturantes (VRS) ou com tráfego \geq TC6(T0), são analisadas até os níveis fundamentais, ou seja, até o nível 4.

Desta forma, os ensaios realizados nas formulações propostas nesta pesquisa foram a Prensa de Compactação Giratória (PCG) (AFNOR NF EN 12697-31, 2019), Duriez a 18 °C (AFNOR NF EN 12697-12, 2018) e deformação permanente a 60 °C (AFNOR NF EN 12697-22, 2020).

Outra etapa de destaque no processo metodológico compreende a descrição detalhada do preparo e incorporação das fibras de sisal na mistura asfáltica, incluindo o corte dos fios no tamanho determinado, o cálculo dos percentuais de dosagem das fibras em relação ao volume de mistura asfáltica, e as etapas do processo de incorporação das fibras durante o processo de usinagem da mistura.

Os tópicos a seguir discorrem sobre a caracterização dos materiais que foram utilizados para produzir as misturas asfálticas estudadas, bem como descrevem os ensaios e procedimentos laboratoriais realizados.

4.2 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

Os materiais utilizados na produção das misturas asfálticas estudadas foram granulares de origem mineral, cimento asfáltico de petróleo (CAP) e fibras de sisal cortadas no tamanho pretendido de 15 mm. Os itens a seguir apresentam a caracterização de cada um desses materiais.

4.2.1 Granulares

Os materiais granulares utilizados nesta pesquisa foram fornecidos pela empresa Rudnick Minérios Ltda., que possui jazida de exploração e planta industrial de britagem no distrito de Pirabeiraba, zona norte do município de Joinville/SC.

Fagundes (2020) aponta que essa jazida situa-se na região de transição do Complexo Granulítico de Santa Catarina e o Granito Pirai, cuja formação geológica é majoritariamente gnaisse, rocha de origem metamórfica, sendo predominantemente composta nesta jazida por quartzo, plagioclásio e anfíbolitos.

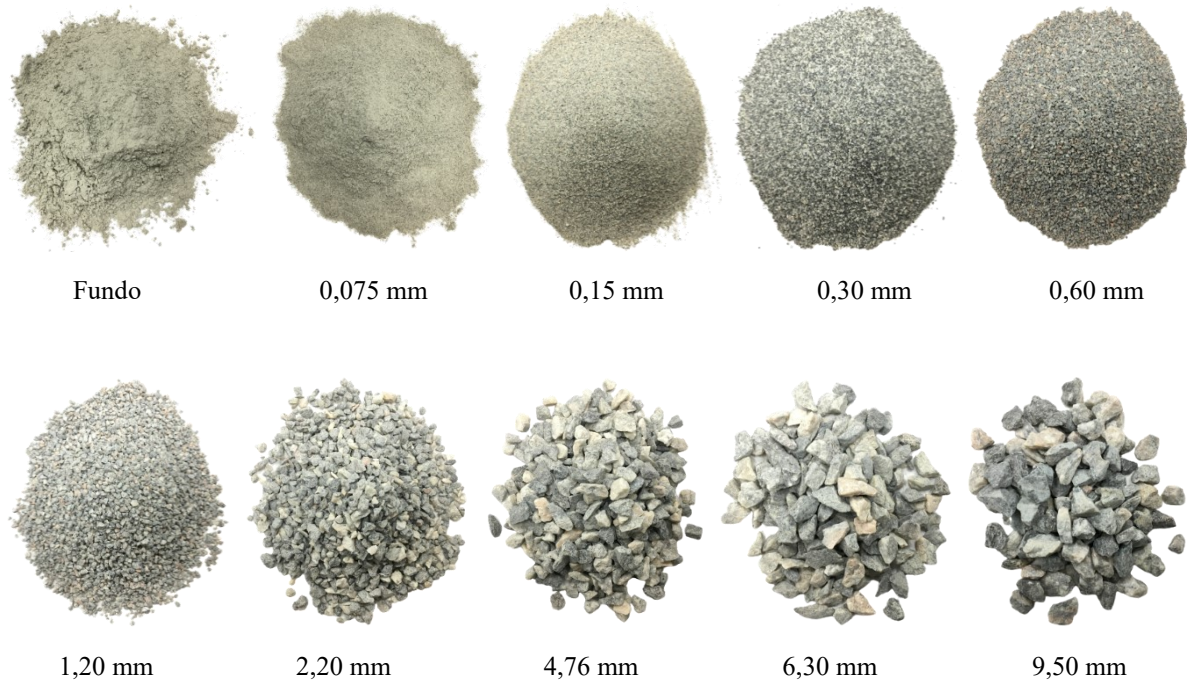
A central de britagem possui britador primário de mandíbula, e britadores secundário e terciário giroféricos, produzindo diversas frações comerciais, desde pó de pedra, até pedra pulmão. Contudo, não raro esse processo de britagem pode conduzir a uma desuniformidade na distribuição granulométrica da fração comercial produzida, ocasionando sobreposição de diâmetros de granulares em diferentes frações comerciais, sobretudo de finos (BARRA, 2005).

As frações comerciais utilizadas nesta pesquisa foram Pó de Pedra, Pedrisco e Brita 0. Entretanto, considerando que a metodologia francesa pressupõe o controle da composição granulométrica da mistura asfáltica através de pontos de controle da granulometria (MANUEL LPC, 2007), foi realizado o peneiramento destes materiais para obtenção das frações homogêneas de granulares com os diâmetros pretendidos para a composição granulométrica definida para a pesquisa.

O processo de peneiramento foi realizado em um peneirador mecânico com peneiras de malha quadrada, de abertura 9,5 mm, 6,3 mm, 4,76 mm, 2,2 mm, 1,2 mm, 0,6 mm, 0,3 mm, 0,15 mm e 0,075 mm, considerando-se como diâmetro nominal o material retido em cada peneira.

A Figura 4.2 apresenta o aspecto visual das frações homogêneas de granulares obtidas através do peneiramento.

Figura 4.2 – Frações homogêneas obtidas após o peneiramento dos granulares.



Fonte: Autor.

Persike (2023) realizou a caracterização dos materiais desta jazida conforme preconizado pelos procedimentos do DNER e ABNT. A Tabela 4.2 apresenta a síntese dos ensaios realizados e resultados obtidos.

Tabela 4.1 – Caracterização dos materiais granulares.

Ensaio	Norma	Limites	Resultados	
			Quantitativo	Qualitativo
Desgaste por abrasão Los Angeles	DNER-ME 035/1998 e DNER-ME 037/1997	Máx. 50 %	13,4 %	-
Índice de forma	ABNT NBR 7809/2006	Mín. 0,5	0,6	Boa subangularidade
Resistência ao ataque químico (Durabilidade)	DNER-ME 089/1994 e DNER-ME 037/1997	Máx. 12 %	5,30 %	-
Adesividade ao ligante betuminoso	DNER-ME 078/1994	-	-	Má
Equivalência de areia	DNER-ME 54/1997	-	78,0 %	
Teor de material pulverulento	DNER-ME 266/1997 e DNER-ME 37/1997	Máx. 1,0 %	0,40 %	
Absorção	-	-	0,33 %	

Fonte: Persike (2023).

Dos resultados apontados por Persike (2023) depreende-se que os granulares analisados atendem aos requisitos para utilização em misturas asfálticas, exceto pelo parâmetro de adesividade, apontado como insatisfatório. Teixeira (2021) aponta que para este caso de estudo, o quartzo que compõe os materiais dessa jazida constitui-se majoritariamente (53,602 %) de material silicoso ($\text{Si}^4\text{O}_2^{-2}$), repelindo as moléculas de carbono (C^{-4}), que constitui a maior parte (> 80 %) da composição do ligante betuminoso.

Isso corrobora com o que fora apontado por Sant'Ana (1992) sobre materiais de natureza eletronegativa, como o quartzo, apresentarem má afinidade eletroquímica ao ligante betuminoso, prejudicando a adesividade da película de ligante sobre o granular, neste caso principalmente em razão da sílica na composição.

Clara (2020) realizou a análise textural da fração comercial de Pó de pedra da mesma jazida, e verificou que estes materiais apresentam baixa porosidade, sobretudo quando comparados a outros materiais pulverulentos, como cinzas de carvão mineral, caso da comparação realizada na pesquisa mencionada. A Tabela 4.3 apresenta a síntese dos resultados obtidos para a fração de Pó de pedra.

Tabela 4.2 – Análise textural de Pó de pedra

Amostra	Área superficial (m^2/g)	Volume de poros (cm^3/g)	Diâmetro médio de poros (Å)
Pó de pedra	3,052	0,012850	168,4

Fonte: Adaptado de Clara (2020).

A condição de baixa porosidade dos granulares dessa jazida também dificulta o processo de ancoragem mecânica do ligante betuminoso sobre os grãos no âmbito da adesividade ativa, bem como o intertravamento do arranjo granular, conforme Clara (2020) destaca.

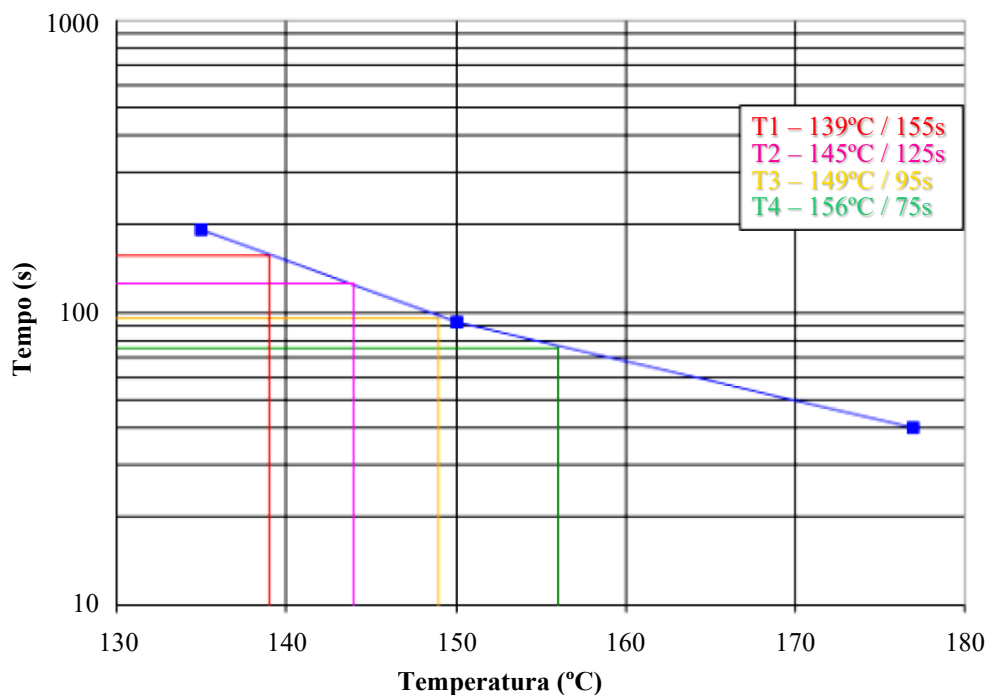
Para situações práticas de aplicação em campo, o parâmetro de adesividade poderia ser otimizado com a incorporação de materiais eletropositivos, como a cal, a fim de corrigir o balanço elétrico entre os granulares e o ligante, criando um dipolo elétrico mais efetivo e melhorando as condições de adesividade. Porém, o objetivo deste trabalho consiste em analisar o real efeito da adição de fibras de sisal na formulação proposta, e, portanto, não foi realizado nenhum tipo de adição de melhoradores de adesividade ou dopes.

4.2.2 Ligante betuminoso

O ligante betuminoso utilizado nesta pesquisa foi um cimento asfáltico de petróleo (CAP) de penetração 30/45 mm, proveniente da refinaria REPLAN da Petrobras, em Paulínia/SP, fornecido pela empresa CBB Asfaltos.

Os dados técnicos de caracterização do ligante foram fornecidos pela própria refinaria via laudo técnico e estão sintetizados na Figura 4.3 e na Tabela 4.4.

Figura 4.3 – Curva de viscosidade *Saybolt-Furol* para o CAP 30/45.



Fonte: REPLAN (2018).

Tabela 4.3 – Laudo técnico do ligante betuminoso.

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

Fonte: REPLAN (2018).

Da Tabela 4.4 infere-se que o ligante atende aos requisitos técnicos estabelecidos pelas especificações aplicáveis, sendo adequado para a utilização em misturas asfálticas. Destaca-se também o resultado do índice de suscetibilidade térmica apresentado (-1,2), muito próximo ao limite inferior da especificação (-1,5) indicando que o ligante é altamente suscetível à variação de temperatura, o que demanda um controle de temperatura efetivo em todas as etapas do processo de produção da mistura asfáltica, a fim de garantir o atendimento a todos os parâmetros de projeto.

Através da curva de viscosidade *Saybolt-Furol* do ligante (Figura 4.3) definiu-se a temperatura de compactação em 145 °C e a temperatura de usinagem em 155 °C. A temperatura adotada para aquecimento dos granulares foi de 168 °C, considerando-se aproximadamente 13 °C acima da temperatura de usinagem, de forma a atender ao intervalo normalmente praticado de 10 °C a 15°C.

É pertinente destacar também que apesar a metodologia francesa dispor de um método de previsão dos possíveis teores de partida para dosagem do ligante betuminoso através do módulo de riqueza (k), estas condições usualmente referem-se a misturas asfálticas convencionais, contexto que não se aplica para o caso de misturas asfálticas com incorporação de fibras vegetais, situação desta pesquisa. Ainda, a literatura científica apresenta poucas informações sobre as condições de trabalhabilidade e os procedimentos de usinagem de misturas asfálticas com fibras de sisal.

Desta forma, em razão da indisponibilidade da Prensa de Compactação Giratória (PCG) quando do início das atividades da campanha experimental, foi realizada uma investigação preliminar das condições de trabalhabilidade das formulações propostas através do ensaio Marshall (DNER-ME 043, 1995), elencando-se quais faixas de teores de ligante de partida seriam validadas posteriormente através da sequência de ensaios da metodologia francesa, conforme apresenta a Tabela 4.1.

Tabela 4.4 – Teores de partida de ligante betuminoso.

Formulação	Teores de ligante betuminoso		
BBSG 0/14 mm + 0,3 % de Sisal	5,18 %	5,50 %	5,82 %
BBSG 0/14 mm + 0,5 % de Sisal	5,50 %	5,82 %	6,14 %

Fonte: Autor.

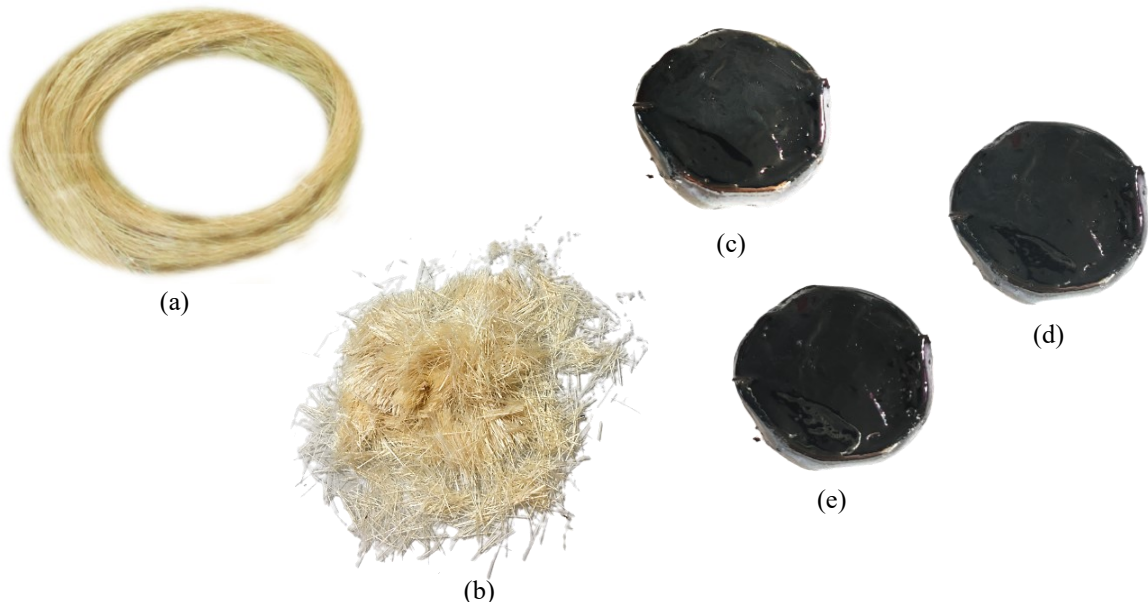
4.2.3 Fibras de sisal

O processo de caracterização das fibras de sisal ocorreu no Laboratório de Caracterização Microestrutural (LACAMI) do Centro Tecnológico SATC, em Criciúma/SC.

Os ensaios 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 para análise consistiram em um feixe de fios inteiros de sisal (Figura 4.4a) para o MEV, e porções individuais de 5g de sisal cortado em fios de 15 mm (Figura 4.4b) para o FRX e DRX, sendo uma amostra para cada ensaio. Para análise da interação do sisal com o ligante betuminoso, foram enviadas amostras de aproximadamente 7g de mástique do ligante betuminoso com 0,3 % e 0,5% de sisal (Figura 4.4c, d), além de uma amostra do ligante puro (Figura 4.4e) para obter parâmetros de comparação em relação aos mástiques com sisal, todos em estado semissólido e em temperatura ambiente.

Figura 4.4 – Amostras enviadas para caracterização laboratorial: (a) fios de sisal inteiros, (b) sisal cortado em fios de 15 mm, (c) mástique de ligante betuminoso com 0,3 % de sisal, (d) mástique de ligante betuminoso com 0,5 % de sisal, e (e) ligante puro.



Fonte: Autor.

Os resultados obtidos nos ensaios supramencionados são descritos nos tópicos 4.2.3.1 a 4.2.3.5.

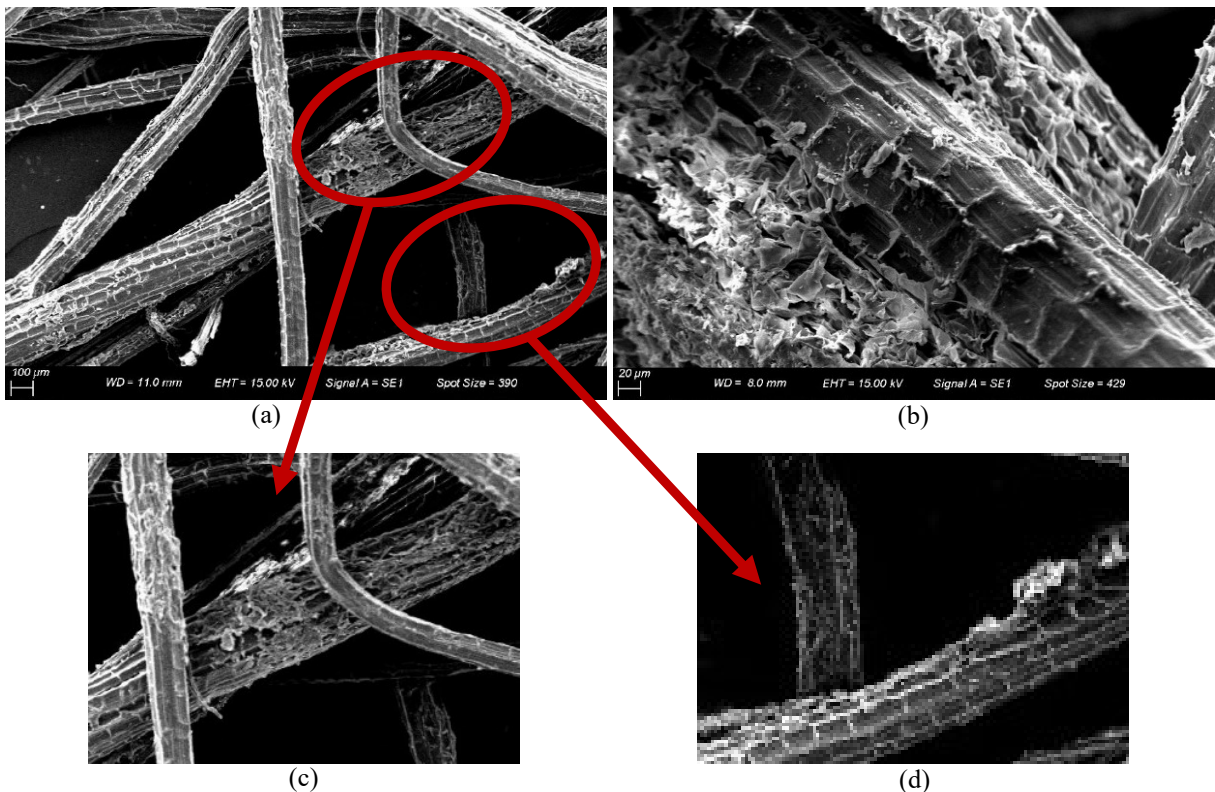
4.2.3.1 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

As imagens obtidas por microscopia eletrônica de varredura (MEV) das fibras de sisal ilustram fios com morfologia alongada, formados por microfibrilas orientadas longitudinalmente. Quando em conjunto, constituem uma disposição em trama, conferindo um aspecto emaranhado, propício à formação de intervalos espaciais e que agregam volume ao material (Figura 4.5a).

A parede celular possui textura escamosa irregular (Figura 4.5b), composta por celulose ($\approx 65,0\%$ a $75,0\%$), hemicelulose ($\approx 10,0\%$ a $15,0\%$) e lignina e pectina ($\approx 10,0\%$ a $15,0\%$), responsáveis pelo processo de impermeabilização natural das fibras, garantindo proteção, rigidez e resistência aos fios (MARTIN *et al.*, 2009; MWAIKAMBO e ANSELL, 2002; MEDINA, 1954).

É possível perceber também pontos de laceração ao longo do comprimento dos fios (Figura 4.5c, d), ocasionadas pelo procedimento de desfibramento por raspagem mecânica das folhas da *Agave Sisalana*, que lhe dá origem, com o intuito de separar a polpa folhal das fibras (Figura 3.5).

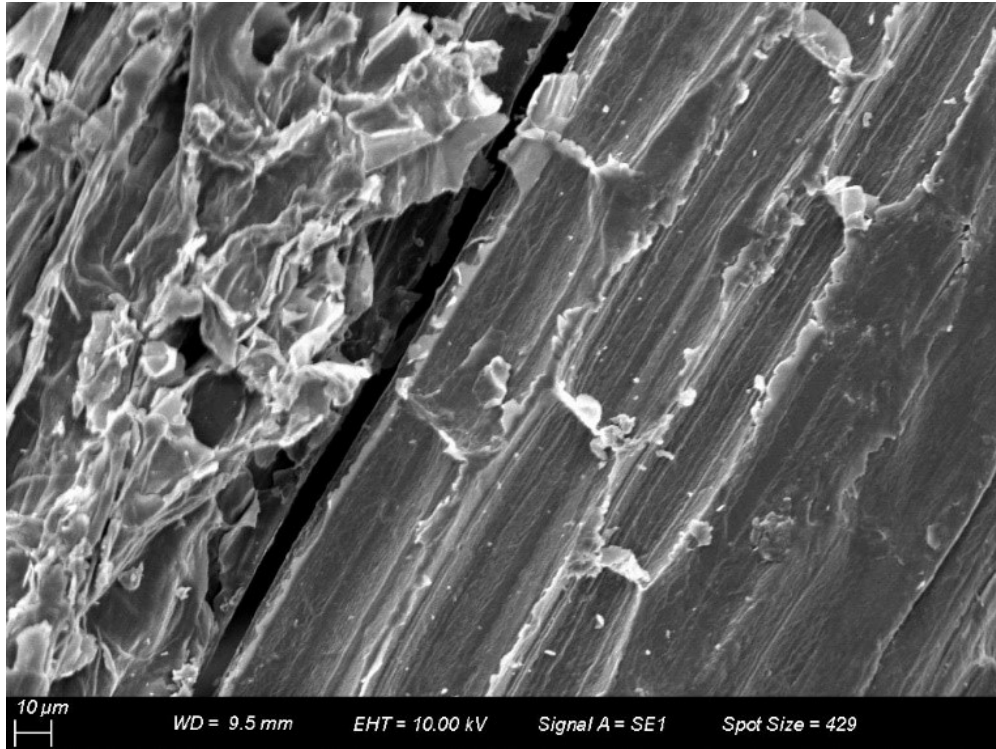
Figura 4.5 – Fibra de sisal: (a) visão geral dos fios (aumento de 390 vezes), (b) textura escamosa da parede celular (aumento de 429 vezes), (c) e (d) detalhes dos pontos de laceração dos fios.



Fonte: Autor.

A manipulação das fibras de sisal por operadores do equipamento desfibrador (Figura 3.5) e o processo de secagem ao ar livre (Figura 3.7) contribuem para aderência e incrustação de partículas sólidas na superfície do material (Figura 4.6).

Figura 4.6 – Partículas sólidas aderidas à parede dos fios da fibra de sisal (aumento de 429 vezes).



Fonte: Autor.

Quanto à composição química determinada por energia dispersiva (EDS) durante a microscopia eletrônica de varredura (Tabela 4.5), foi verificada a presença expressiva dos elementos Carbono (C) e Oxigênio (O), o que se deve à associação com o Cálcio (Ca) na formação de Carbonato (CaCO_3), composto muito presente na parede celular das fibras de sisal (GUTIÉRREZ; RODRÍGUEZ; RÍO, 2008).

Tabela 4.5 – Composição química obtida por EDS no procedimento de 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: Autor.

Ainda, o Oxigênio propicia reações para a formação dos compostos óxidos e da Hidroxila (OH), este último oriundo das fortes pontes de Hidrogênio (O–H) existentes no material, relacionadas à umidade presente nas amostras. Os elementos potássio (K), Magnésio (Mg) e Alumínio (Al), em menor escala, são substâncias inorgânicas não pertencentes à parede celular das fibras de sisal, sendo basicamente vinculadas às reações produtoras de óxidos (ZHU; HAO; ZHANG, 2018).

4.2.3.2 Espectrometria por fluorescência de Raios-X (FRX)

A composição química das fibras de sisal por Espectrometria por Fluorescência de Raios-X (FRX), a partir de energia dispersiva, foi determinada com o uso do equipamento *Shimadzu*, modelo EDX 7000, tendo sido obtida a seguinte distribuição percentual dos elementos em termos de óxidos (Tabela 4.6).

Tabela 4.6 – 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 (%)	100,000

Fonte: Autor.

Cabe ressaltar que as amostras não foram submetidas ao processo prévio de perda ao fogo (PF), pois em razão da característica natural da fibra de sisal ser próxima ao de uma palha seca, conduziria à carbonização dos fios na forma de pó, o que inviabilizaria a análise do material.

Dos resultados obtidos, verifica-se que o Óxido de Cálcio (CaO) é predominante na composição, fato explicado por ser um elemento derivado do Carbonato de Cálcio (CaCO₃), um composto inorgânico naturalmente presente na parede celular das fibras de sisal, conforme abordado no tópico 4.2.3.1.

Quanto ao Dióxido de Titânio (TiO₂), tem-se que não constitui naturalmente a composição deste material, mas a sua expressiva presença na amostra é resultado de uma

aplicação normalmente utilizada na indústria como estabilizante térmico, para fornecimento de proteção aos fios quanto ao ataque intempérico, sobretudo à radiação ultravioleta (UV) (RADETIĆ, 2013).

O Potássio (K_2O) está vinculado às substâncias inorgânicas não pertencentes à parede celular, a qual é composta sobretudo por celulose, hemicelulose e lignina, conforme já abordado no tópico 4.2.3.1. O conteúdo e a proporção destes componentes variam dependendo da espécie do material lignocelulósico, do clima e condições do solo, representando aproximadamente 5,0 % a 20,0 % da biomassa (VÁSQUEZ, 2017).

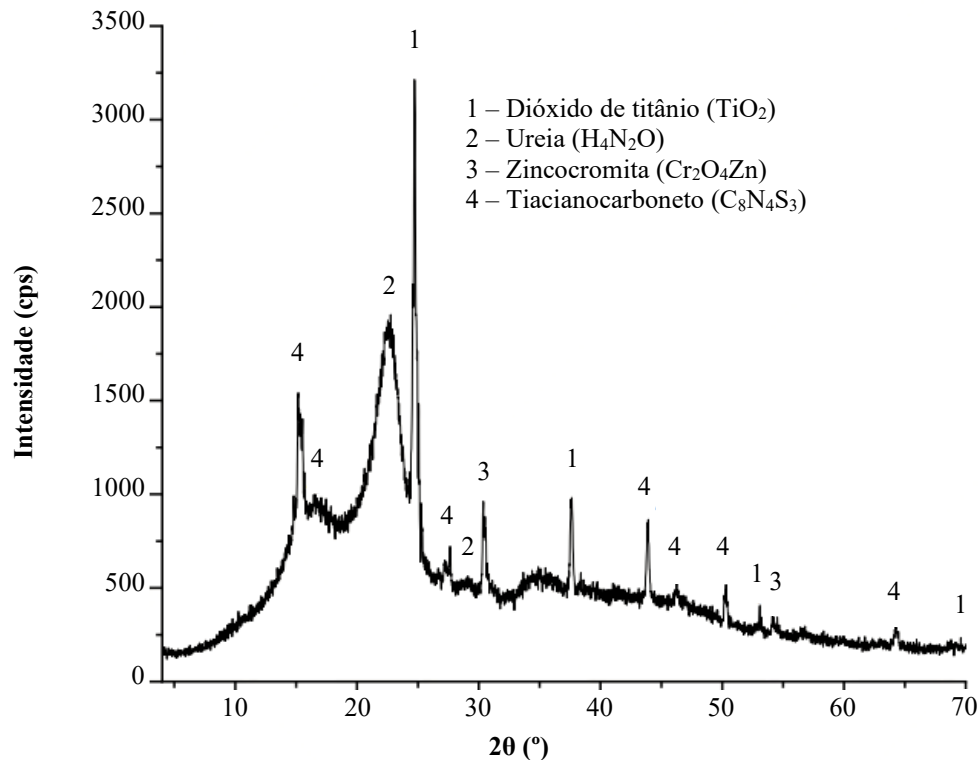
A participação dos elementos mais pesados como Ferro (Fe_2O_3), Cromo (Cr_2O_3), Zinco (ZnO) e Enxofre (SO_3), bem como o Alumínio (Al) e o Magnésio (Mg) apresentados na Tabela 4.4, ocorrem em concentrações muito baixas, atendendo aos limites impostos pela norma ABNT NBR 10004 (2004), que identifica os resíduos perigosos quanto à toxicidade. Desta forma, a fibra de sisal estudada pode ser classificada como Resíduo Não Perigoso, Classe II B, Inertes.

Neste contexto, tem-se que apesar do baixo percentual destes elementos na composição das fibras de sisal estudadas, Dias (2009) destaca suas contribuições à outra utilidade deste material frequentemente observada na indústria agrícola: a formulação de fertilizantes para adubação de solos.

4.2.3.3 Difratomia de Raios-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 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*, e está apresentada graficamente na Figura 4.7.

Figura 4.7 – Difratoograma das amostras de fibra de sisal.



Fonte: Autor.

A partir da análise do difratograma da Figura 4.7, tem-se que as fases metálico-cristalinas são predominantes na composição da fibra de sisal estudada. Cabe destacar que para a aplicação do Dióxido de Titânio (TiO₂) no processo de estabilização térmica dos fios, conforme abordado no tópico 4.2.3.2, normalmente incorpora-se Uréia (H₄N₂O) com o intuito de produzir uma reação exotérmica de combustão não explosiva (GÓES, 2006).

Entretanto, é possível notar que os picos que envolvem a fase correspondente à Uréia possuem um bom espaçamento, tanto o de maior quanto o de menor intensidade, associados a uma linha radioativa irregular (ruídos), indicando a formação de cristalitos pequenos e elevada percentagem de amorfos presentes nas amostras, oriundos da expressiva presença de celulose, hemicelulose e lignina, conforme abordado no tópico 4.2.3.1. Estes fatores suscitam pouca reatividade da Uréia no processo exotérmico (KIKUKAWA *et al.*, 2004).

No que tange à indústria agrícola, uma das alternativas para elevar o valor nutritivo do resíduo do sisal utilizado em fertilizantes é o tratamento químico com Uréia, que reduz as barreiras físico-químicas da digestão da parede celular por microrganismos e incrementa o conteúdo de Nitrogênio (FARIA *et al.*, 2008).

A fase de Zincocromita ($\text{Cr}_2\text{O}_4\text{Zn}$) é proveniente do grupo dos espinélios (WANG *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 (Tabela 4.6).

Os Tiacianocarbonos ($\text{C}_8\text{N}_4\text{S}_3$) compõem o grupo dos cianos, os quais produzem cristais amarelados, insolúveis em água e petróleo, mas não resistentes às cetonas. Estão associados aos compostos parafínicos, que constituem as resinas presentes na parede celular das fibras de sisal. São também eficientes como fungicidas (SIMMONS *et al.*, 1962; VAN SCHOOR *et al.*, 1961).

Portanto, a partir das análises quanto à caracterização das amostras, depreende-se que as fibras de sisal utilizadas nesta pesquisa não se encontram em seu estado natural, tal como obtidas logo após o desfibramento mecânico no campo, já tendo sido submetidas a processos químicos industriais com o intuito de torná-las mais resistentes e multifuncionais.

4.2.3.4 Termogravimetria (TGA) e Calorimetria Diferencial (DSC)

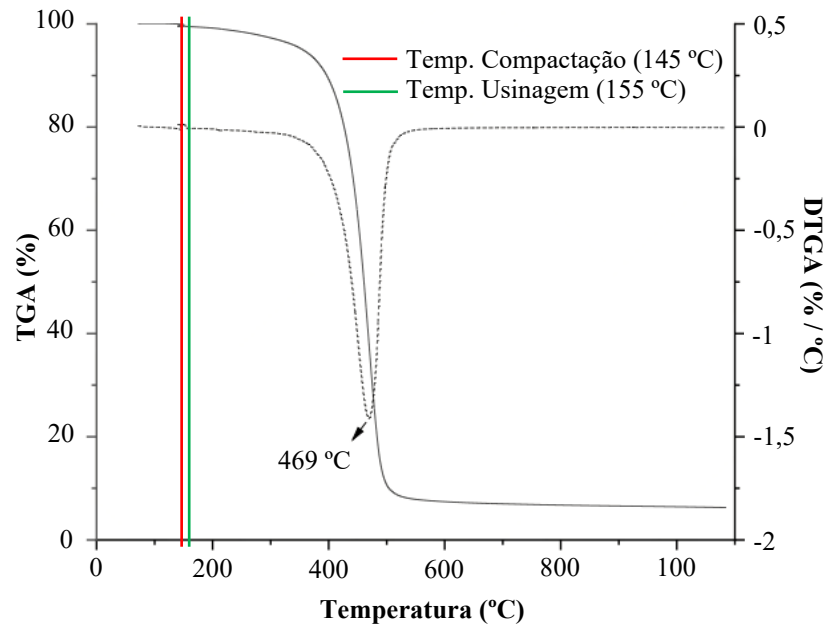
A determinação da perda de massa da fibra de sisal foi realizada em função do aumento gradativo da temperatura. O objetivo principal consistiu em verificar a partir de qual temperatura o material começa a perder massa de maneira significativa quando aglutinado ao ligante betuminoso, com o indicativo de que deste ponto em diante as fibras deixam de contribuir gradativamente com as suas propriedades à formulação das misturas asfálticas.

As avaliações foram procedidas com uso do Analisador Termogravimétrico e de Calorimetria Diferencial (TGA/DSC) TA *Instruments*, modelo *Discovery* SDT 650. Em todos os casos, a temperatura foi elevada de 50 °C para 1100 °C, com taxa de aquecimento de 10 °C/min, sob atmosfera de ar sintético, uma vez que a real condição de aplicação das misturas asfálticas a serem testadas caracteriza-se como um ambiente altamente agressivo e oxidante (tanto no momento da usinagem, quanto nas condições em campo a céu aberto), e portanto, compatível com as condições de atmosfera de ar sintético. Os dados foram tratados com o uso do *software* TRIOS.

Para a amostra de ligante betuminoso + 0,3 % de sisal a perda de massa total obtida foi de 93,77 %, sendo que um evento exotérmico observado à temperatura de 469 °C foi responsável pela perda de massa em 89,67 %.

A Figura 4.8 ilustra a evolução da perda de massa (TGA) e sua primeira derivada (DTGA), representadas pelas linhas cheia e tracejada, respectivamente.

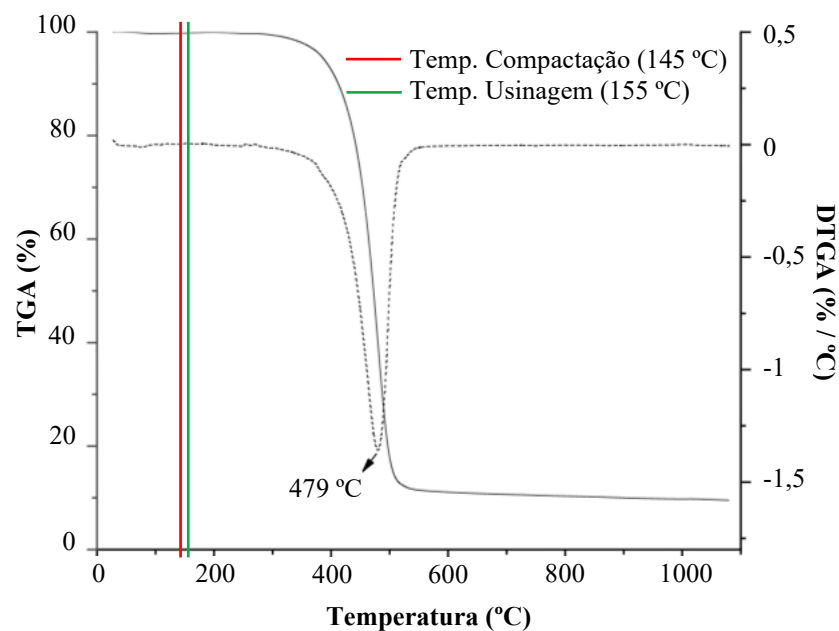
Figura 4.8 – TGA/DTGA da amostra de ligante betuminoso + 0,3 % de sisal.



Fonte: Autor.

Cenário similar foi observado para a amostra de ligante betuminoso + 0,5 % de sisal, em que a perda de massa total obtida foi de 90,56 %, tendo ocorrido também um evento exotérmico à temperatura de 479 °C, responsável pela perda de massa em 88,32 %. A Figura 4.9 ilustra a evolução da perda de massa (TGA) e sua primeira derivada (DTGA), representadas pela linha cheia e tracejada, respectivamente.

Figura 4.9 – TGA/DTGA da amostra de ligante betuminoso + 0,5 % de sisal.



Fonte: Autor.

Analisando as curvas termogravimétricas, percebe-se que as amostras não sofreram perdas significativas de massa nas temperaturas de trabalho pretendidas para a utilização destes materiais (temperaturas de compactação e usinagem), indicando pouca suscetibilidade térmica das fibras de sisal, devido ao encapsulamento pelo agente aglutinante, situação que se mantém até próximo da temperatura de 400°C.

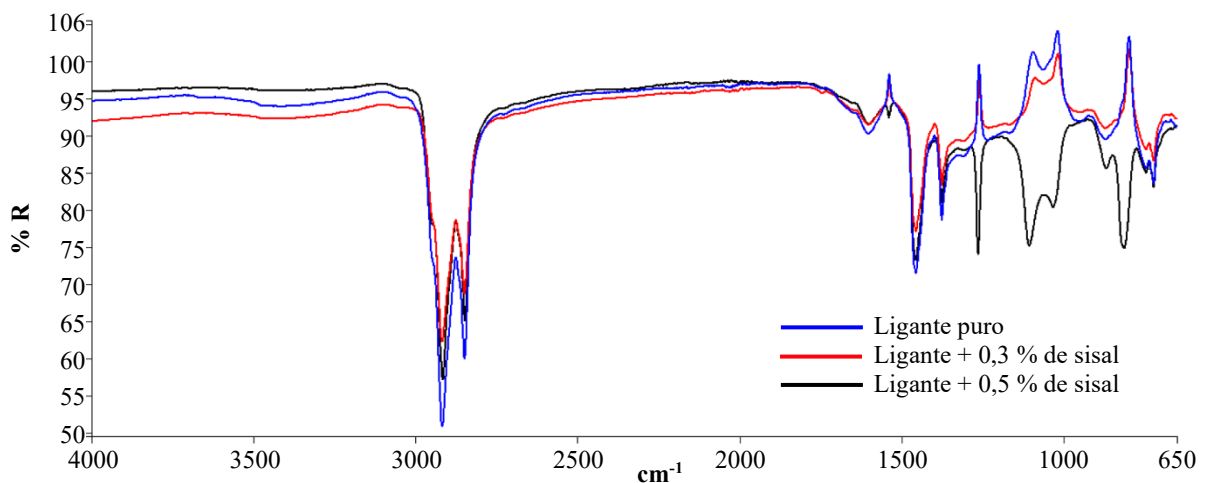
Porém, os fenômenos exotérmicos verificados após 460 °C indicam degradação estrutural tanto do ligante betuminoso quanto das fibras de sisal, razão pela qual os percentuais de perda de massa são praticamente a totalidade do montante verificado em todo o processo termogravimétrico, conforme apontam as taxas percentuais de perda por unidade de temperatura nas curvas correspondentes às primeiras derivadas (DTGA).

O composto de maior responsabilidade por esta boa resistência das fibras de sisal ao processo termogravimétrico é o Dióxido de Titânio (TiO₂), presente em quantidade expressiva na composição química das amostras (Tabela 4.6 e Figura 4.7), pois é reconhecido por apresentar uma excelente atividade fotocatalítica, biocompatível, não tóxico, além de apresentar propriedades antimicrobianas e proteção UV (CADORIN *et al.*, 2021; RADETIĆ, 2013).

4.2.3.5 Espectroscopia infravermelha por transformada de Fourier (FTIR)

As análises foram realizadas a partir da técnica de Espectroscopia Infravermelha por Transformada de Fourier (FTIR). Os espectros obtidos são expressos em percentual de refletância (% R) por comprimento de onda (cm⁻¹) (Figura 4.10), com o uso do *software Spectrum*, utilizando o método de Reflexão Total Atenuada Universal (UATR).

Figura 4.10 – Espectros por FTIR das amostras com ligante betuminoso.



Fonte: Autor.

Analisando comparativamente os resultados obtidos no ensaio de FTIR, é possível perceber uma estabilidade espectral de todas as amostras na faixa de comprimentos de onda compreendida nos intervalos entre 4000 cm^{-1} e 3000 cm^{-1} , bem como entre 2700 cm^{-1} e 1600 cm^{-1} .

No primeiro intervalo verifica-se a presença de bandas suaves na região entre 3400 cm^{-1} e 3100 cm^{-1} , provocadas pela presença de grupos relativos às ligações com o átomo de Hidrogênio (H), ou seja, as pontes de Hidrogênio, mais especificamente o Oxigênio (O–H) e o Nitrogênio (N–H).

Cabe ressaltar que os grupos O–H são correlacionados à formação de grupos carboxílicos, mas também podem ser atribuídos à umidade presente nas amostras, que podem ser oriundas tanto da higroscopia resultante do processo de lavagem em água a que são submetidas as fibras de sisal após o processo de desfibramento (Figura 3.5), quanto da presença de Hidroxila (OH) na composição natural das fibras de sisal, conforme abordado no tópico 4.2.3.1.

Quanto ao segundo intervalo, verificam-se bandas isoladas a 1700 cm^{-1} referentes à formação de grupos carbonílicos (C=O), podendo-se destacar a presença dos ácidos carboxílicos, aldeídos, amidas, anidridos, cetonas e ésteres.

Na faixa entre 2900 cm^{-1} e 2700 cm^{-1} as inflexões constatadas se dão devido ao alongamento das vibrações das cadeias asfálticas dos grupos C–H, que caracterizam a natureza do ligante betuminoso como hidrocarboneto, constituindo o maior percentual de sua composição química (tópico 4.2.2).

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 relativo 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 são resultantes de várias ligações dos átomos de Carbono, Nitrogênio, Oxigênio e Enxofre com metais presentes em pequenas concentrações na composição amostral, estando em conformidade com as informações apresentadas nas Tabelas 4.5 e 4.6.

É importante destacar que as descrições espectrais apresentadas estão em consonância com pesquisas conduzidas por diversos autores (BASSYOUNI, 2018; MENAPACE; YIMING; MASAD, 2017; YU *et al.*, 2014; SULTANA; BHASIN, 2014; ARAUJO *et al.*, 2013).

4.3 MÉTODOS APLICADOS

A campanha experimental desta pesquisa iniciou com a definição da composição granulométrica da mistura asfáltica estudada, seguido da preparação das fibras de sisal.

Na sequência, foram realizados os ensaios de Massa Volumétrica Real (MVR) de todas as formulações propostas, haja vista ser um parâmetro necessário para a realização de alguns dos ensaios subsequentes.

Posteriormente, foram realizados os ensaios da metodologia francesa aplicáveis à mistura estudada, isto é, Prensa de Compactação Giratória (PCG) (AFNOR NF EN 12697-31, 2019); Duriez a 18 °C (AFNOR NF EN 12697-12, 2018) e deformação permanente a 60 °C (AFNOR NF EN 12697-22, 2020).

Os tópicos a seguir denotam o procedimento de cada uma destas etapas.

4.3.1 Composição granulométrica

Embora seja possível definir a composição granulométrica através do método por tentativa, esse procedimento incorre, não raro, na sobreposição de diâmetros dos granulares entre as frações heterogêneas utilizadas, conduzindo, em muitos casos, a um cenário de difícil controle da granulometria (ANDRADE, 2018).

Desta forma, esta pesquisa recorreu ao método racional, utilizando a equação de *Füller-Talbot* (4.1 e 4.2), que permite calcular a composição granulométrica com base em parâmetros previamente estabelecidos pelo projetista, conforme equações apresentadas a seguir.

$$\%p = a \left(\frac{d}{D} \right)^n \quad (4.1)$$

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

Onde:

%p : percentagem em peso passante em uma dada abertura da série de peneiras;

a : constante, tomada igual a 100;

d : abertura da malha de uma dada peneira, em mm;

D : diâmetro máximo da série de peneiras, em que passa 100% das frações, em mm;

n : expoente de graduação;

%p_i : percentagem em peso que passa na peneira de menor diâmetro da série de peneiras.

Fixando-se o percentual passante na peneira de abertura 0,075 mm em 7,0 % e definindo a peneira com abertura de 12,50 mm como aquela em quem passa 100 % das frações, calculou-se o expoente da curva teórica em análise $n = 0,52$, sendo possível então calcular os percentuais passantes e retidos em cada uma das peneiras selecionadas.

A Tabela 4.7 apresenta a composição granulométrica calculada com base nos critérios apresentados.

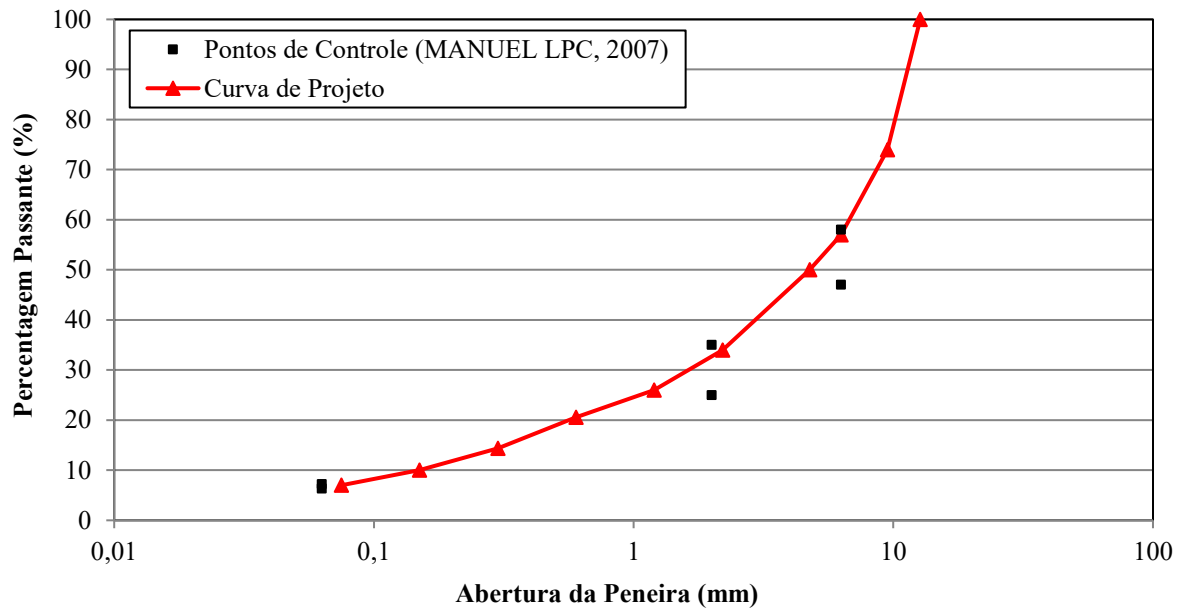
Tabela 4.7 – Composição granulométrica calculada pelo método racional.

Peneira (mm)	Percentagem passante (%)	Percentagem retida (%)
12,7	100,00	0,00
9,5	74,00	26,00
6,3	57,00	17,00
4,76	50,00	7,00
2,2	34,00	16,00
1,2	26,00	8,00
0,6	20,60	5,40
0,3	14,40	6,20
0,15	10,00	4,40
0,075	7,00	3,00
Fundo		7,00

Fonte: Autor.

A Figura 4.11 denota a representação gráfica desta composição granulométrica, indicando também os pontos de controle estabelecidos pelo *Manuel LPC (2007)* para misturas densas, do tipo BBSG.

Figura 4.11 – Representação gráfica da composição granulométrica calculada.



Fonte: Autor.

Verifica-se que a curva calculada apresenta bom enquadramento aos parâmetros para misturas BBSG. A partir disso, foram tomados os valores de referência para os ensaios a serem realizados, haja vista que o *Manuel LPC (2007)* estabelece os limites e critérios normativos com base no enquadramento aos grupos de misturas asfálticas da metodologia francesa.

4.3.2 Preparação das fibras de sisal

Conforme tratado no tópico 3.4, tendo por base experiências prévias relatadas na literatura, definiu-se que as fibras de sisal seriam incorporadas às misturas asfálticas no comprimento de 15 mm.

Como as fibras utilizadas foram fornecidas em fardos com fios alongados, o processo de corte ocorreu com auxílio de um gabarito, onde foi possível encaixar o feixe de fibras e cortá-las com auxílio de um estilete, através de um friso previamente realizado no gabarito, na dimensão pretendida de 15 mm, conforme demonstrado na Figura 4.12.

Figura 4.12 – Procedimento de corte das fibras de sisal.



Fonte: Autor.

A quantidade de sisal incorporada às formulações estudadas foi dosada em relação ao volume de mistura asfáltica.

Desta forma, considerando que a massa (peso) corresponde algebricamente ao produto da densidade pelo volume, tem-se que o peso de sisal proporcional ao volume de mistura asfáltica pode ser expresso através da Equação 4.3:

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

Onde:

P_{sisal} : peso de sisal a ser incorporado à mistura asfáltica;

$dA_{mistura}$: densidade aparente da mistura asfáltica, obtida através da medição e pesagem dos corpos de prova;

V_{sisal} : volume de sisal.

E que:

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

Onde:

V_{sisal} : volume de sisal;

$V_{mistura}$: volume da mistura asfáltica, obtido através da medição dos corpos de prova;

$\%_{sisal}$: percentual da dosagem de sisal, podendo ser 0,3 ou 0,5 nesta pesquisa.

Desta forma, substituindo a equação 4.4 em 4.3, tem-se:

$$P_{sisal} = d_{Amistura} \times V_{mistura} \times \left(\frac{\%_{sisal}}{100} \right) \quad (4.5)$$

Onde:

P_{sisal} : peso de sisal a ser incorporado à mistura asfáltica;

$d_{Amistura}$: densidade aparente da mistura asfáltica;

$V_{mistura}$: volume da mistura asfáltica;

$\%_{sisal}$: percentual da dosagem de sisal, podendo ser 0,3 ou 0,5 nesta pesquisa.

Assim, por questões práticas, foi possível converter o volume de sisal em peso correspondente, sendo esta unidade de medida mais usual para o contexto do laboratório de pavimentação, bem como por questões de precisão da amostragem.

As amostras de sisal foram pesadas em laboratório com auxílio de uma balança digital modelo *Kern 572* com precisão de $\pm 0,01g$, e separadas individualmente em recipientes para posteriormente serem adicionadas às respectivas misturas asfálticas, conforme mostra a Figura 4.13.

Figura 4.13 – Processo de pesagem e separação das amostras de sisal.



Fonte: Autor.

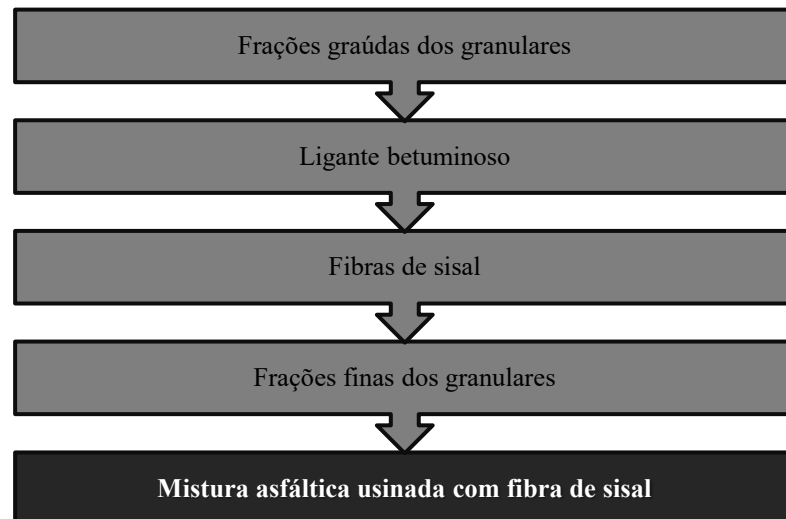
O procedimento de incorporação das amostras de sisal à mistura asfáltica é descrito de maneira detalhada no tópico 4.3.3.

4.3.3 Incorporação das fibras de sisal à mistura asfáltica no processo de usinagem

Em razão da rara disposição de detalhes na literatura científica acerca dos procedimentos de incorporação das fibras de sisal à mistura asfáltica durante o processo de usinagem, foi necessário perscrutar previamente e de maneira experimental qual seria a sequência de etapas mais adequada para as formulações testadas nesta pesquisa.

Assim, concomitante à investigação prévia das condições de trabalhabilidade das misturas através do ensaio Marshall, realizou-se variações no processo de usinagem, sobretudo na ordem de incorporação das fibras de sisal, chegando-se à sequência de etapas que foi adotada para todas as usinagens realizadas posteriormente, conforme mostra a Figura 4.14.

Figura 4.14 – Etapas do processo de usinagem das misturas asfálticas com fibras de sisal.



Fonte: Autor.

A Figura 4.15 denota de maneira ainda mais detalhada esse processo, que consiste em realizar a mistura das frações graúdas dos granulares (diâmetros $\geq 2,20$ mm) com o ligante betuminoso (Figura 4.15a) até o recobrimento completo dos granulares (Figura 4.15b), e na sequência, começar a polvilhar os fios de sisal sobre a mistura, intervalando as inserções em 2 ou 3 porções distintas (Figura 4.15c, d) de modo que todas as fibras sejam recobertas por uma película de ligante, e que o misturador dissipe parte dos emaranhados que tendem a se formar durante essa etapa. Após toda porção de sisal ter sido incorporada e homogeneizada (Figura 4.15e), adiciona-se as frações finas dos granulares (diâmetros $< 2,20$ mm) (Figura 4.15f), continuando o processo de mistura, até atingir um aspecto homogêneo (Figura 4.15g), momento

em que a mistura pode então ser retirada do misturador (Figura 4.15h), e seguir para as etapas de condicionamento em estufa e posterior compactação.

Figura 4.15 – Usinagem das misturas asfálticas com incorporação de fibras de sisal.

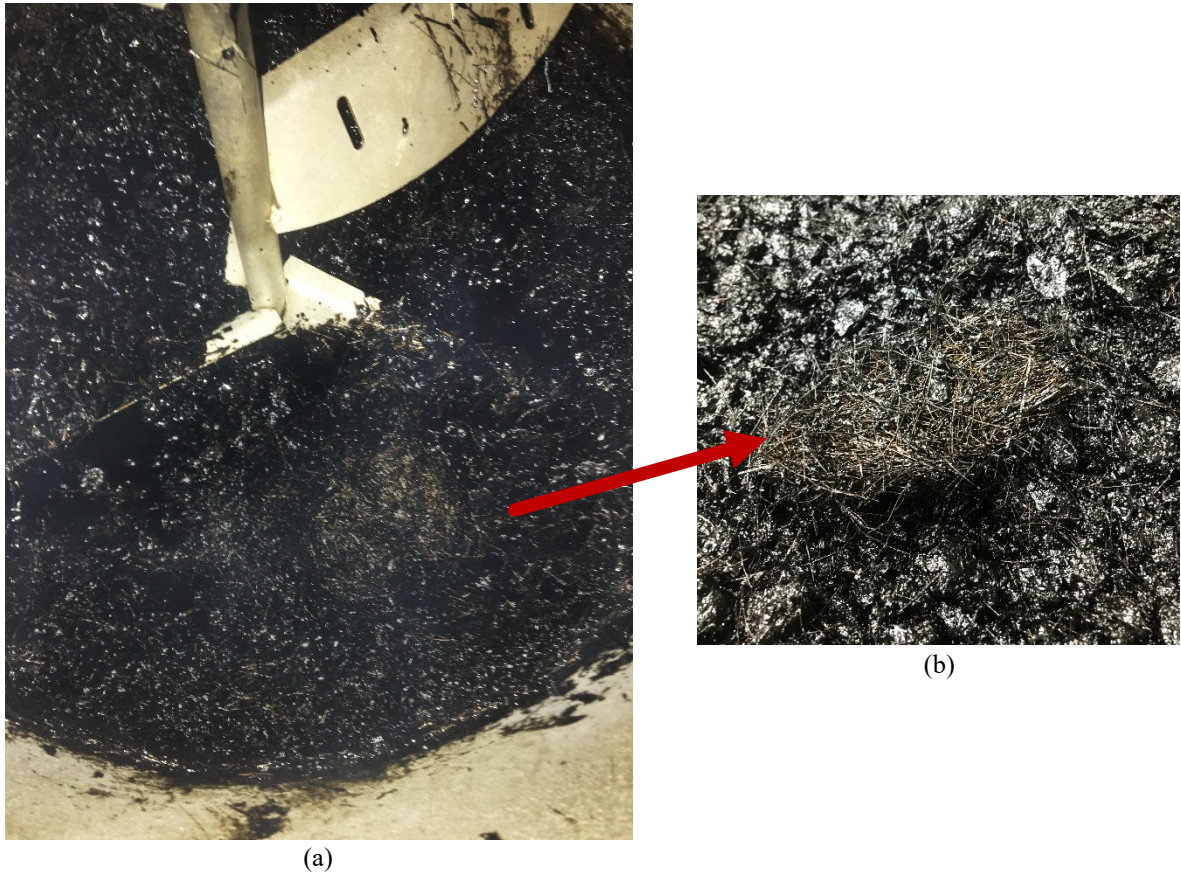


Fonte: Autor.

Uma tendência constante verificada durante o processo foi a formação de emaranhados de sisal que se aglutinam rapidamente em forma de tramas (Figura 4.16), e dificilmente são dissipados pelo misturador, sendo necessário, em muitos casos, intervir manualmente com auxílio de espátula outro acessório, para dismantelá-los, tanto quanto possível.

Percebeu-se que essa tendência se mostrou progressivamente mais intensa tanto quanto maior foi o percentual de sisal adicionado. Contudo, observou-se também que com a incorporação das frações finas dos granulares, a distribuição do sisal se torna mais homogênea, bem como o aspecto geral da mistura em usinagem.

Figura 4.16 – (a) Formação de emaranhados de fios de sisal durante o processo de usinagem e (b) detalhe de um emaranhado.



(a)

(b)

Fonte: Autor.

Mesmo realizando o polvilhamento dos fios de sisal de forma gradual e intervalada, e eventualmente dissipando manualmente alguns dos emaranhados que tendem a se formar, verificou-se que todas as misturas com essa fibra incorporada apresentaram, no aspecto final, algumas tramas de fios emaranhados que não era possível dismantelar, pois, conforme observa-se no detalhe da Figura 4.16b, as fibras se aglutinam ao ligante betuminoso, adquirindo um aspecto tramado, e assim permanecem, sendo esta uma característica das misturas asfálticas com esse tipo de incorporação.

Cabe destacar também que apesar do procedimento demonstrado na Figura 4.15 ser realizado em um misturador mecânico devido se tratarem de amostras para os ensaios da PCG e deformação permanente, a mesma sequência de procedimentos foi aplicada para preparação de amostras de menores, para os ensaios de MVR e Duriez, porém de forma manual, com auxílio de espátulas em recipiente apropriado.

Todos os procedimentos ocorreram em equipamentos com controle de aquecimento, respeitando-se a todo tempo a temperatura de usinagem definida previamente (tópico 4.2.2),

sendo este um aspecto extremamente relevante, pois percebeu-se que qualquer perda de temperatura durante a usinagem altera imediatamente a viscosidade do ligante, e dificulta consideravelmente as condições de trabalhabilidade da mistura ainda no processo de usinagem, tornando a homogeneização de todas as frações ainda mais dificultosa.

4.3.4 Massa Volumétrica Real (MVR)

A Massa Volumétrica Real (MVR) é um parâmetro físico que visa analisar a densidade real da mistura asfáltica não compactada, sendo um parâmetro prévio necessário em diversos ensaios e etapas do processo de formulação das misturas asfálticas.

O procedimento do ensaio consistiu em preparar duas amostras de 635,0 g para cada formulação a ser ensaiada, conforme parâmetros e dosagens já definidos previamente. Após usinadas, as amostras foram dispostas em bandejas, para resfriarem à temperatura ambiente.

Posteriormente, foram destorroadas manualmente, e adicionadas, individualmente, em um picnômetro com rolha, de peso e volume conhecidos, preenchido com aproximadamente 800 ml de água em temperatura ambiente.

O conjunto picnômetro + água + amostra foi pesado, e na sequência levado para uma bomba de vácuo com pressão de 0,05 MPa durante 2 horas para saturação completa das amostras. Por fim, o volume restante até a marcação do picnômetro foi preenchido com água, e então realizada a última pesagem do conjunto após a bomba de vácuo. A Figura 4.17 apresenta o procedimento deste ensaio.

Figura 4.17 – Ensaio MVR.



Fonte: Autor.

De posse de todas as pesagens, a massa volumétrica real de cada amostra foi obtida através das Equações 4.6 e 4.7, sendo o valor final correspondente à média obtida a partir de duas determinações para cada formulação ensaiada.

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

$$V_{amostra} = V_{pic} - \left(\frac{P_3 - P_{amostra} - P_{pic+rolha}}{\rho_{\acute{a}gua}} \right) \quad (4.7)$$

Onde:

MVR : massa volumétrica real da mistura asfáltica (g/cm³);

P_{amostra} : peso da amostra (g);

V_{amostra} : volume da amostra (cm³);

V_{pic} : volume do picnômetro até a marcação da rolha (cm³);

P₃ : peso do conjunto picnômetro, rolha, água até a marcação e amostra (g);

P_{pic+rolha} : peso do picnômetro e rolha (g);

ρ_{água} : massa específica da água (g/cm³).

A Tabela 4.8 apresenta os resultados obtidos no ensaio de MVR para as formulações ensaiadas, bem como da formulação de referência elaborada previamente por Persike (2023).

Tabela 4.8 – MVR das misturas asfálticas.

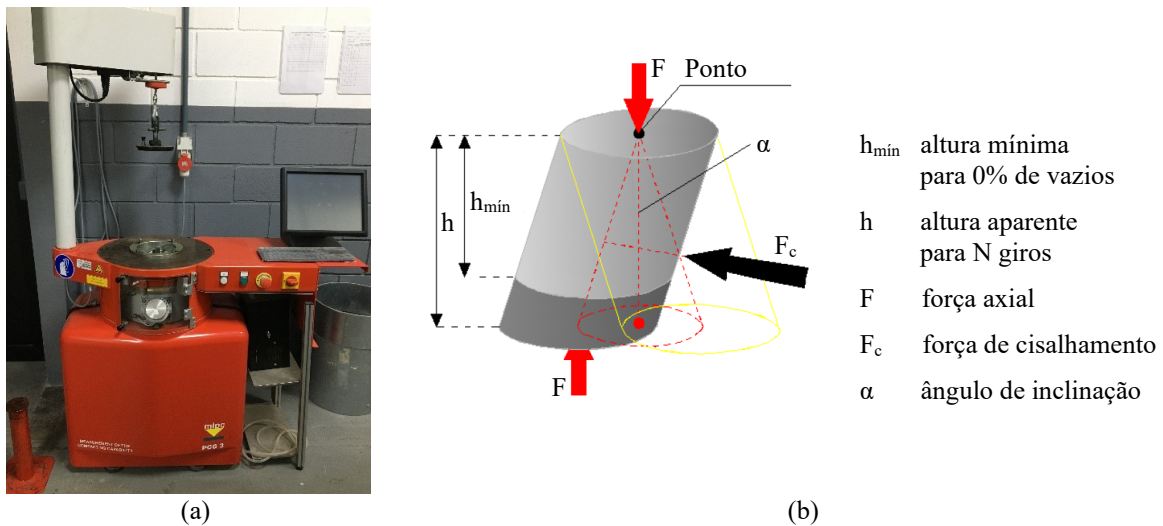
Formulação	Teor de Ligante (%)	MVR (g/cm ³)
BBSG 0/14 mm – Referência (PERSIKE, 2023)	4,70	2,510
	4,86	2,508
BBSG 0/14 mm + 0,3 % de Sisal	5,18	2,485
	5,50	2,476
	5,82	2,466
	5,50	2,473
BBSG 0/14 mm + 0,5 % de Sisal	5,82	2,465
	6,14	2,454

Fonte: Autor.

4.3.5 Prensa de compactação Giratória (PCG)

Este ensaio avalia a habilidade de compactação das misturas asfálticas com o uso da Prensa de Compactação por Cisalhamento Giratória (PCG) (AFNOR NF EN 12697-31, 2019), através de um carregamento lento, à baixa compressão estática, e em condições isotérmicas, executado por um movimento giratório (cisalhante) de uma face em torno do eixo de simetria do corpo de prova, aplicando um ângulo α . A Figura 4.18 apresenta uma PCG Tipo 3 e seu princípio de funcionamento.

Figura 4.18 – (a) Prensa de Compactação Giratória (PCG-3) e (b) seu princípio de funcionamento.



Fonte: (a) Autor e (b) adaptado de Manuel LPC (2007).

A excentricidade do ângulo α realizada pela face do dispositivo durante a aplicação da força axial reproduz o esforço cisalhante que ocorre na interface dos granulares quando da aplicação de carregamento proveniente dos equipamentos de compactação em campo, conduzindo o corpo de prova a uma condição de intertravamento do arranjo granular semelhante ao que ocorre no processo de compactação em campo. Esse ângulo α pode variar de acordo com o tipo de PCG disponível, porém corresponde, de forma geral, a 1° na parte externa do corpo de prova e $0,82^\circ$ na parte interna.

Com base na massa volumétrica real (MVR) da mistura asfáltica, determina-se a percentagem de vazios, relacionando-se a altura mínima do corpo de prova para 0 % de vazios (h_{\min}) e a altura final do corpo de prova (h) após um determinado número de giros. Os valores obtidos devem atender ao especificado na metodologia francesa para o tipo de mistura asfáltica estudada.

A massa de mistura asfáltica das amostras também é calculada através da massa volumétrica real (MVR), definindo-se a altura mínima (h_{\min}) do cilindro igual ao respectivo diâmetro interno, que pode variar conforme o tipo de PCG disponível. Nesta pesquisa, o diâmetro interno dos corpos de prova foi de $150,0 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$. Desta forma, a massa de cada amostra ensaiada foi calculada através da Equação 4.8.

$$M = 2,651 \times MVR; \varnothing = 150,0 \text{ mm} \quad (4.8)$$

Onde:

M : massa do corpo de prova (g);

MVR : massa específica volumétrica real da mistura asfáltica a vácuo (g/cm^3).

A força aplicada também varia de acordo com o diâmetro do molde, de forma a resultar numa tensão vertical em torno de 0,6 MPa, o que demanda uma força de 10 kN a 12 kN para moldes com diâmetro interno de $150,0 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$.

Conforme definição de amostragem definida pela metodologia francesa para esse ensaio, foram preparados 3 corpos de prova para cada teor de ligante e formulação analisada, adotando-se a média dos resultados obtidos como valor final para cada uma.

O processo de usinagem das amostras ocorreu em um misturador mecânico, com controle de temperatura, em sequência de procedimentos análoga ao descrito no tópico 4.3.3. Após a usinagem da mistura, a preparação do conjunto molde e mistura ocorreu conforme Barra (2009) descreve:

- Coloca-se os moldes e as pastilhas na estufa, durante 2 horas, à temperatura de ensaio (determinada pela curva de viscosidade do ligante betuminoso);
- Unta-se os moldes com óleo mineral, com a ajuda de um pincel;
- Pesa-se em um recipiente separado a massa da mistura asfáltica;
- Coloca-se de uma só vez a mistura no interior do molde e mantêm-se o conjunto completo (molde, pastilhas e mistura) em estufa à temperatura de compactação, por um período entre 30 minutos e 2 horas antes do início do ensaio.

Conforme abordado no tópico 4.2.2, a temperatura de compactação definida é $145 \text{ }^\circ\text{C}$, em razão das características de viscosidade do ligante betuminoso utilizado. O controle de

temperatura da mistura asfáltica na estufa transcorreu com o auxílio de um termopar digital *Autonics TC4S* com precisão de $\pm 1,0$ °C, em que a sonda do equipamento foi introduzida na porção central da mistura no interior do molde, conforme apresentado na Figura 4.19.

Figura 4.19 - Controle de temperatura com auxílio de termopar digital.



Fonte: Autor.

Durante o período de condicionamento térmico da mistura no interior do molde, procedeu-se com a preparação da PCG, inserindo no programa do equipamento de aquisição de dados as informações de entrada sobre a mistura asfáltica a ser ensaiada: tipo de mistura asfáltica, massa volumétrica real da mistura (MVR), massa volumétrica real dos granulares (MVRg), teor e massa específica do ligante betuminoso.

Nos 30 minutos que antecederam o ensaio, um molde metálico aquecido foi introduzido na câmara interna da PCG, para reduzir ao máximo a perda de temperatura do conjunto mistura e molde durante o ensaio, pois a PCG não possui sistema próprio de aquecimento.

Atingida a temperatura de compactação, o molde com a mistura asfáltica foi inserido na câmara da PCG, dando início ao ensaio. Imediatamente, um carregamento na ordem de 150 N a 300 N foi aplicado sobre a mistura por um período de 30 segundos, sem rotação e inclinação. Na sequência, iniciou-se o processo de rotação da máquina, aplicando-se a força axial e a inclinação no decorrer do número de giros definido para o ensaio.

Após conclusão do ensaio, o molde foi retirado da câmara da PCG, e o corpo de prova extraído. A Figura 4.20 apresenta o processo de desmoldagem, e os corpos de prova já desmoldados após a realização do ensaio.

Figura 4.20 – (a) Processo de desmoldagem dos corpos de prova, e (b) corpos de prova desmoldados após o ensaio.



(a)



(b)

Fonte: Autor.

O sistema de aquisição de dados do equipamento realiza as medições das alturas do corpo de prova, sem interrupção do ensaio, a uma precisão de $\pm 0,2$ mm, considerando a seguinte série de giros: 0, 1, 2, 3, 4, 5, 7, 10, 15, 20, 25, 30, 40, 50, 60, 80, 100.

De posse das alturas medidas pelo equipamento e a altura mínima do corpo de prova determinada previamente, é possível obter o percentual de vazios para cada número de giros analisado, através da Equação 4.9.

$$\% V = 100 \times \left(\frac{h_{(ng)} - h_{\min}}{h_{(ng)}} \right) \quad (4.9)$$

Onde:

%V : porcentagem de vazios da mistura asfáltica;

$h_{(ng)}$: altura média de três medições da altura do corpo de prova por giro;

h_{\min} : altura mínima do corpo de prova para 0% de vazios.

O parâmetro normativo da metodologia francesa para misturas do tipo BBSG 0/14 mm define que para 80 giros, o percentual de vazios calculado deve estar entre 4,0 % e 9,0 % (MANUEL LPC, 2007).

4.3.6 Ensaio de Duriez

O ensaio Duriez (AFNOR NF EN 12697-12, 2018) avalia a resistência à ação deletéria da água em misturas asfálticas, comparando os valores de ruptura por compressão simples de corpos de prova condicionados em imersão em água por 7 dias e corpos de prova condicionados a seco.

Conforme definição de amostragem definida pela metodologia francesa para esse ensaio, foram preparados 12 corpos de prova com massa de 1,0 kg e diâmetro de 80,0 mm \pm 1,0 mm para cada teor de ligante e formulação analisada. O processo de usinagem das misturas ocorreu de forma análoga ao descrito no tópico 4.3.3.

Na sequência, os moldes cilíndricos de aço e as misturas asfálticas usinadas foram condicionados em estufa, separadamente, por duas horas, realizando-se o controle de temperatura através de termômetro.

Atingida a temperatura de compactação, a mistura asfáltica foi colocada no molde cilíndrico de aço e iniciou-se o processo de compactação por duplo pistão. A carga de aplicação especificada para o ensaio de 60 kN foi atingida em 1 minuto, a fim de reduzir ao máximo a perda de temperatura no processo, e após alcançada, mantida por 5 minutos. Após a compactação, os corpos de prova repousaram em temperatura ambiente por 4 horas, e posteriormente foram desmoldados com auxílio de um pistão hidráulico. As Figuras 4.21 e 4.22 apresentam esses procedimentos.

Figura 4.21 – Procedimentos de compactação por duplo pistão no ensaio Duriez.



Fonte: Autor.

Figura 4.22 – Corpos de prova do ensaio de Duriez desmoldados.



Fonte: Autor.

Os corpos de prova desmoldados (Figura 4.23), passaram por um período de cura durante 24 horas à temperatura ambiente (15°C a 25°C), sendo realizada, após esse período, a verificação das massas de cada um, com precisão de $\pm 1,0$ g, e da altura média a partir de três determinações em pontos diferentes, com de $\pm 0,1$ mm, para determinação da massa volumétrica aparente (MVA).

Na sequência, cada grupo de 12 corpos de prova preparados para cada formulação e teor de ligante, foram divididos em dois grupos de 6 unidades.

O primeiro grupo foi condicionado em câmara com temperatura de $18^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ e umidade do ar em $50\% \pm 1\%$ durante 7 dias corridos. O segundo grupo foi submetido a um processo prévio de desobstrução dos vazios com jateamento de ar comprimido, lavagem em água corrente e inserção em um dessecador com água a uma pressão residual de vácuo a $350\text{ mmHg} \pm 5\%$ por aproximadamente 2 horas (Figura 4.23).

Figura 4.23 – Detalhe do processo de saturação dos corpos de prova na câmara à vácuo.



Fonte: Autor.

Na sequência, os corpos de prova desse grupo foram retirados da câmara de vácuo, e colocados em uma câmara térmica a $18\text{ °C} \pm 1\text{ °C}$, imersos em água, durante 7 dias (Figura 4.24).

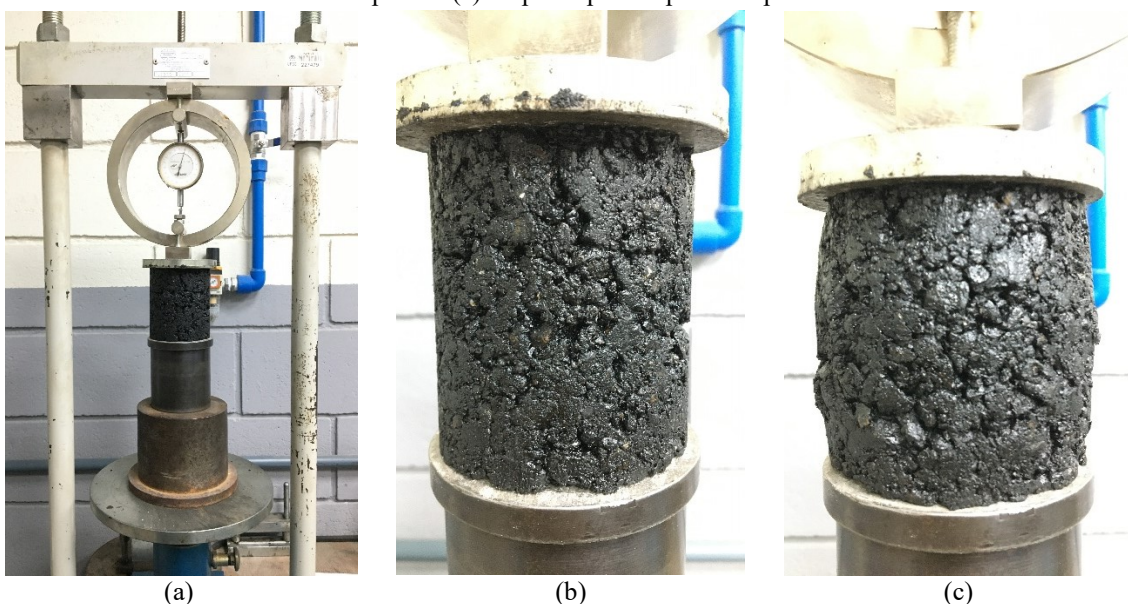
Figura 4.24 – Condicionamento dos corpos de prova em imersão em água à temperatura de $18\text{ °C} \pm 1\text{ °C}$.



Fonte: Autor.

Transcorridos 7 dias de condicionamento, os corpos de prova dos dois grupos foram submetidos à compressão simples em uma prensa hidráulica com velocidade de avanço do prato de $1,0\text{ mm/s}$, sendo registrado os respectivos valores máximos de ruptura. A Figura 4.25 apresenta esse procedimento.

Figura 4.25 – Ruptura à compressão simples dos corpos de prova: (a) prensa hidráulica, (b) corpo de prova antes da ruptura e (c) corpo de prova após da ruptura



Fonte: Autor.

A partir dos valores máximos de ruptura, é possível estabelecer a relação r/R , dos corpos de prova condicionados em imersão (r) em relação aos corpos de prova condicionados a seco (R).

O parâmetro normativo da metodologia francesa para misturas do tipo BBSG define que a relação r/R deve ter um valor superior a 0,70, que significa perda de resistência inferior a 30 % decorrente do processo de condicionamento por imersão dos corpos de prova (MANUEL LPC, 2007).

4.3.7 Deformação permanente

O ensaio de deformação permanente (AFNOR NF EN 12697-22, 2020) consiste em verificar a resistência das misturas asfálticas em relação ao afundamento na trilha de roda, através da aplicação de ciclos de carregamento na frequência de 1 Hz com um pneumático, em um número de ciclos definido, em câmara térmica à temperatura de 60 °C.

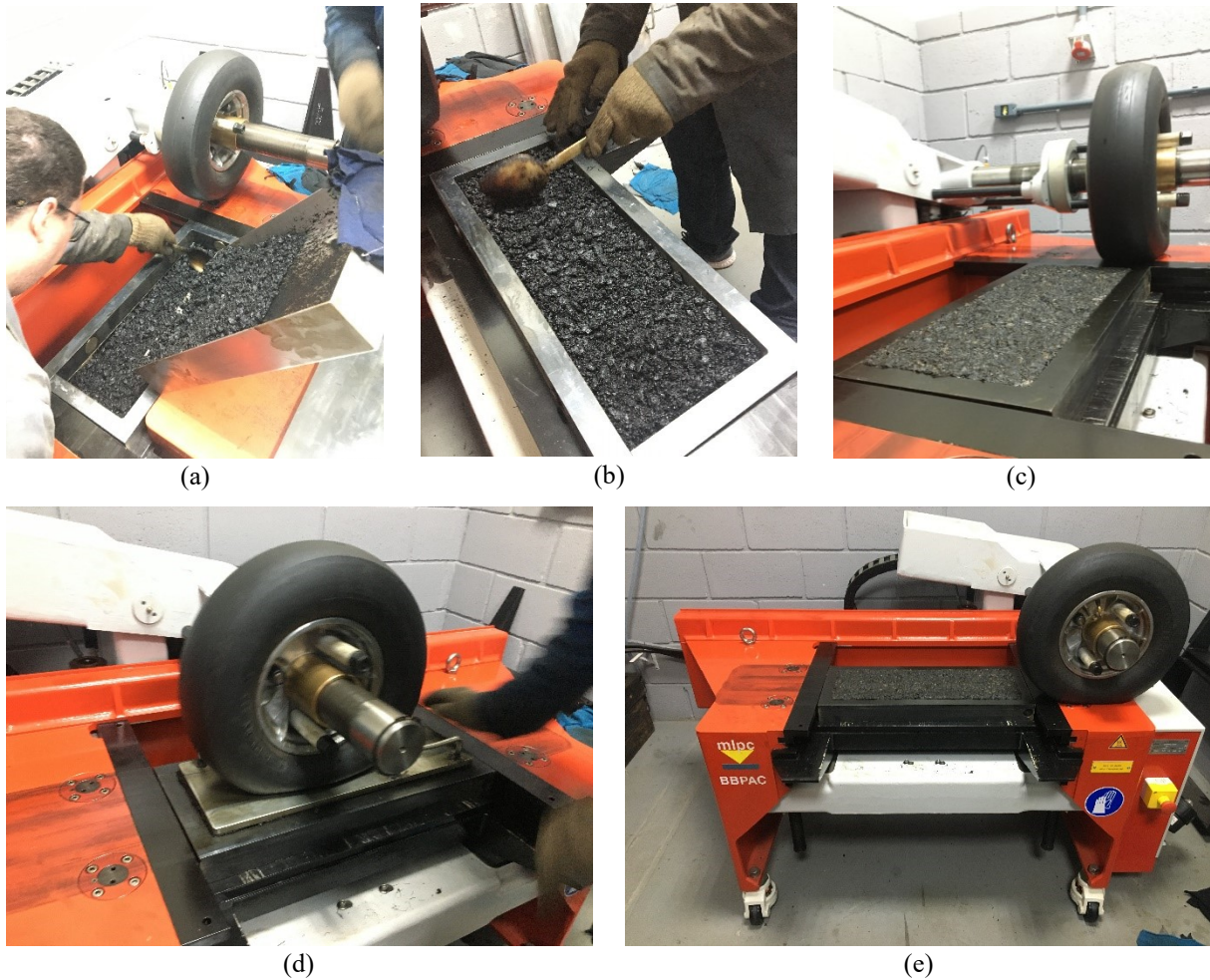
Com base na massa específica aparente da mistura compactada (MVA), calcula-se a quantidade de material a ser usinado para preencher o molde da placa. O molde usado nessa pesquisa possui 180,00 mm de largura, 500,00 mm de comprimento, com espessura de 50,00 mm, dado à aplicação do tipo de mistura asfáltica estudada ser em camadas de rolamento e/ou ligação a espessuras de 5,0 a 9,0 cm, conforme tratado no tópico 2.2.1.3.1.

Respeitando-se a amostragem definida pela metodologia francesa para esse ensaio, foram preparadas 2 placas para cada teor de ligante e formulação analisada. O processo de usinagem das misturas asfálticas ocorreu em um misturador mecânico, com controle de temperatura, em sequência de procedimentos análoga ao descrito no tópico 4.3.3.

Os moldes da placa e a mistura usinada foram dispostos, separadamente, em estufa por um período entre 30 minutos e 2 horas, até atingirem a temperatura de compactação. O controle de temperatura foi realizado com auxílio de um termopar digital *Autonics TC4S* com precisão de $\pm 1,0$ °C, de forma similar do demonstrado na Figura 4.20.

Atingida a temperatura de compactação, o molde foi instalado na mesa compactadora pneumática, e posteriormente preenchido com a mistura asfáltica usinada. O procedimento de compactação ocorreu de acordo os critérios previstos na norma AFNOR NF EN 12697-22 (2020), conforme mostrado na Figura 4.26.

Figura 4.26 – Processo de compactação das placas na mesa compactadora pneumática: (a) preenchimento do molde da placa com a mistura asfáltica, (b) regularização da mistura no molde, (c, d) compactação da mistura asfáltica e (e) placa compactada.



Fonte: Autor.

Após a compactação, foi respeitado um período de cura de quinze dias, com as placas dispostas em superfície plana e temperatura ambiente (15°C a 25°C), a fim de garantir tempo suficiente para desencadear todas as reações químicas entre os materiais, e estabelecimento da ancoragem da matriz betuminosa à superfície dos granulares.

Posteriormente, cada par de placas foi inserido na máquina de deformação permanente (Figura 4.27), que possui uma câmara com sistema de aquecimento. A norma preconiza que este ensaio deve ser realizado na temperatura de 60°C . Desta forma, o par de placas ficou no interior da câmara do equipamento por aproximadamente duas horas, até que atingir a temperatura especificada para o ensaio, sendo monitorada por uma sonda térmica acoplada à placa.

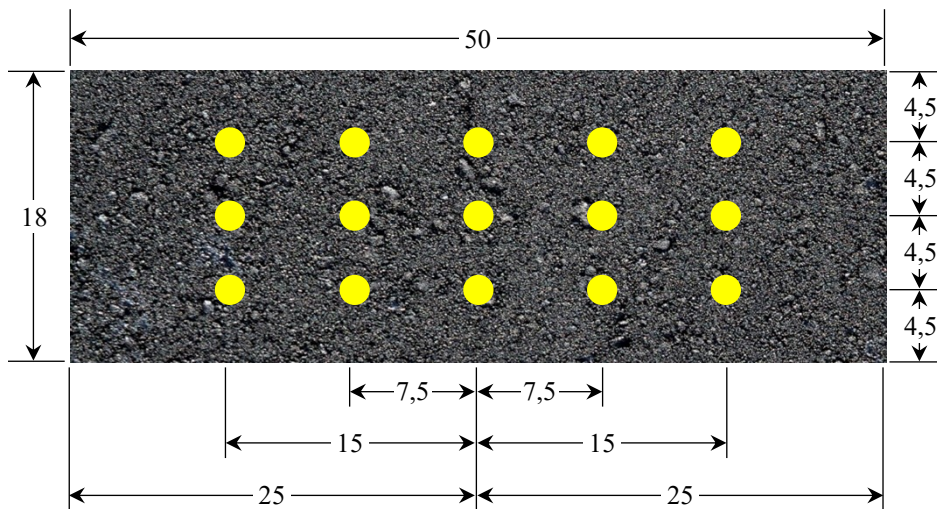
Figura 4.27 – Máquina de deformação permanente.



Fonte: Autor.

Com auxílio de um extensômetro e paquímetro, foi realizada a medição das condições superficiais das placas em 15 pontos distintos, conforme mostrado na Figura 4.28, antes do início do ensaio. Essas medições serviram como referência para as leituras realizadas posteriormente, após a aplicação do número de ciclos preconizado pela norma.

Figura 4.28 – Pontos de leitura da deformação permanente.



Fonte: Autor.

O ensaio foi então iniciado, consistindo na passagem de um eixo de roda simples e textura lisa, com carga de 5,0 kN e pressão de inflação de 0,6 MPa, à frequência de 1 Hz, por 30.000 ciclos, conforme preconizado para misturas do tipo BBSG.

Após completados, respectivamente 100, 300, 1.000, 3.000, 10.000 e 30.000 ciclos, foram realizadas leituras na superfície da placa, conforme indicado na Figura 4.28.

Completado o número de ciclos de aplicação de carga, e de posse de todas as leituras, obtém-se, para cada série de ciclos, a média dos afundamentos gerados pela ação do carregamento. A profundidade das trilhas de roda é calculada conforme a Equação 4.10.

$$Y = A \times \left(\frac{N}{1000} \right)^b \quad (4.10)$$

Onde:

- Y : profundidade da deformação na trilha de roda em N ciclos;
- A : coeficiente linear, obtido experimentalmente;
- N : número de ciclos;
- b : coeficiente angular, obtido experimentalmente.

Caso o afundamento médio alcance, a qualquer tempo, 15 % do valor da espessura inicial, o ensaio é interrompido, e a mistura reprova neste nível de avaliação.

A metodologia francesa classifica as misturas do tipo BBSG em três classes distintas, com relação ao percentual de afundamento na trilha de roda (MANUEL LPC, 2007), sendo:

- Classe 1: afundamento $\leq 10,0$ % da espessura da placa;
- Classe 2: afundamento $\leq 7,5$ % da espessura da placa;
- Classe 3: afundamento $\leq 5,0$ % da espessura a placa.

Caso o afundamento na trilha de roda seja maior do que 10% da espessura da placa, a mistura é considerada inadequada no critério de resistência à deformação permanente.

CAPÍTULO 5

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos na campanha experimental da pesquisa, bem como as discussões técnicas correspondentes.

Conforme tratado nos tópicos 1.2.2 e 1.3, Persike (2023) realizou a mesma matriz de ensaios em uma mistura asfáltica de mesma formulação desta pesquisa (BBSG 0/14 mm), porém, produzida apenas com frações britadas, tendo indicado que o teor de ligante betuminoso de referência para esta formulação é 4,70 %, apresentando também os resultados obtidos para a formulação com um teor de ligante acima deste (4,86 %).

Desta forma, os resultados apresentados por Persike (2023) foram compilados aos resultados obtidos na presente pesquisa, considerando-os como referência e parâmetro de comparação aos resultados obtidos com as formulações propostas com fibra de sisal.

Os tópicos a seguir discorrem sobre os resultados de cada um dos ensaios realizados.

5.1 HABILIDADE DE COMPACTAÇÃO NA PCG

No que se refere à avaliação da habilidade de compactação das misturas asfálticas na prensa de compactação giratória, percebe-se que todas se enquadraram aos critérios normativos da metodologia francesa para BBSG 0/14 mm, com percentual de vazios respeitando a faixa de aceitabilidade de 4,0 % a 9,0 % para 80 giros (MANUEL LPC, 2007).

A Tabela 5.1 apresenta a média dos resultados, obtida a partir da realização de 3 amostras de cada formulação testada.

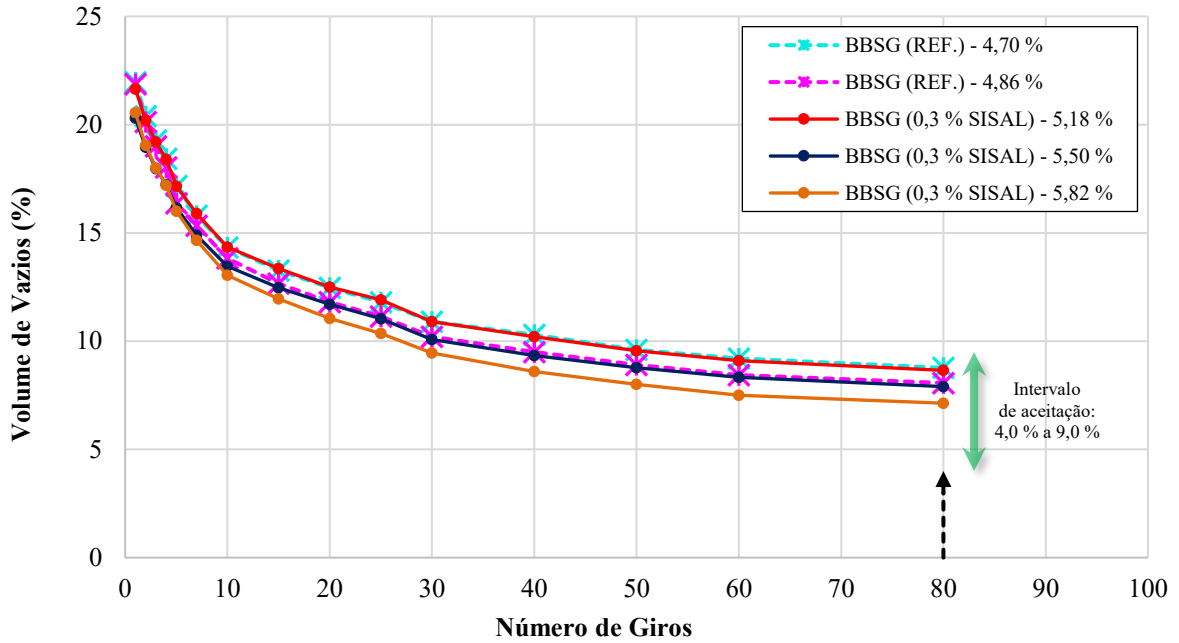
Tabela 5.1 – Teores de vazios obtidos no ensaio de avaliação da habilidade de compactação na PCG.

Formulação	Teor de ligante (%)	%V para 80 giros (%)
BBSG 0/14 mm – Referência (PERSIKE, 2023)	4,70	8,8
	4,86	8,1
BBSG 0/14 mm + 0,3 % de Sisal	5,18	8,7
	5,50	7,9
	5,82	7,1
BBSG 0/14 mm + 0,3 % de Sisal	5,50	8,8
	5,82	8,1
	6,14	7,3

Fonte: Autor.

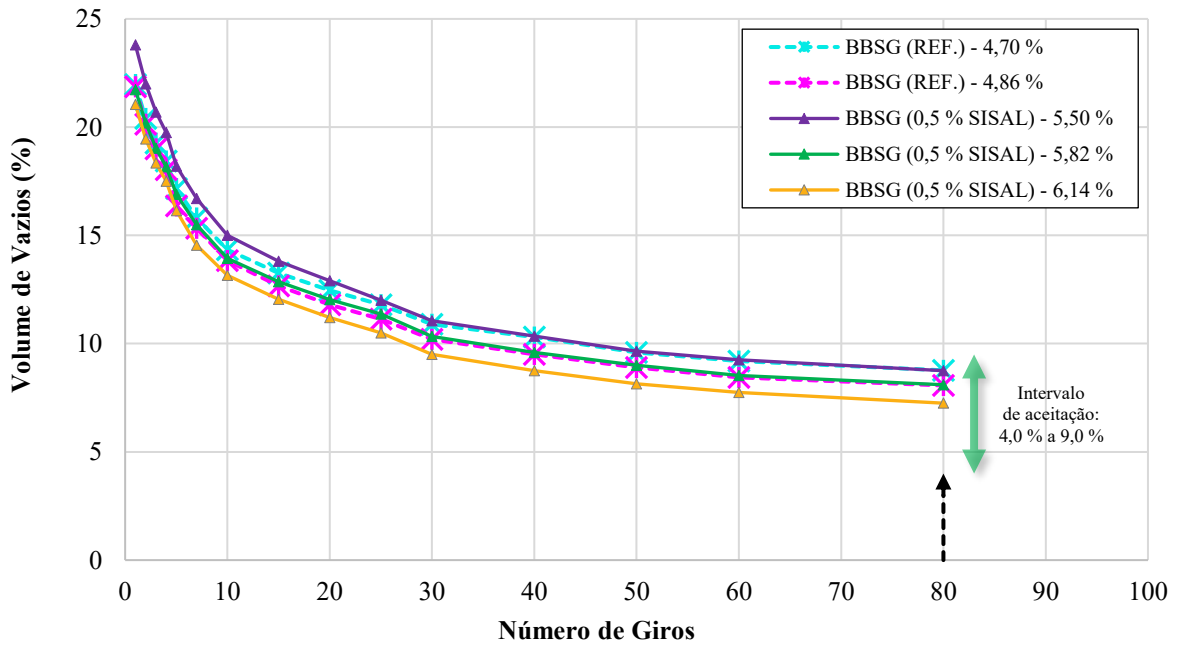
As Figuras 5.1 e 5.2 apresentam o desenvolvimento das curvas de percentual de vazios em função do número de giros para as formulações com 0,3 % e 0,5 % de sisal respectivamente.

Figura 5.1 – Habilidade de compactação na PCG das misturas asfálticas com 0,3 % de sisal.



Fonte: Autor.

Figura 5.2 – Habilidade de compactação na PCG das misturas asfálticas com 0,5 % de sisal.



Fonte: Autor.

Comparando os resultados obtidos nas formulações de referência às formulações com sisal, percebe-se que a incorporação desta fibra resulta num aumento significativo do percentual de vazios nas misturas asfálticas, haja vista que na formulação de referência, com 4,70 % de ligante, %V = 8,8 %, enquanto na formulação com 0,3 % de sisal o valor mais próximo a este é obtido com 5,18 % de ligante, e na formulação com 0,5 % de sisal o mesmo percentual de vazios é obtido apenas com 5,50 % de ligante betuminoso.

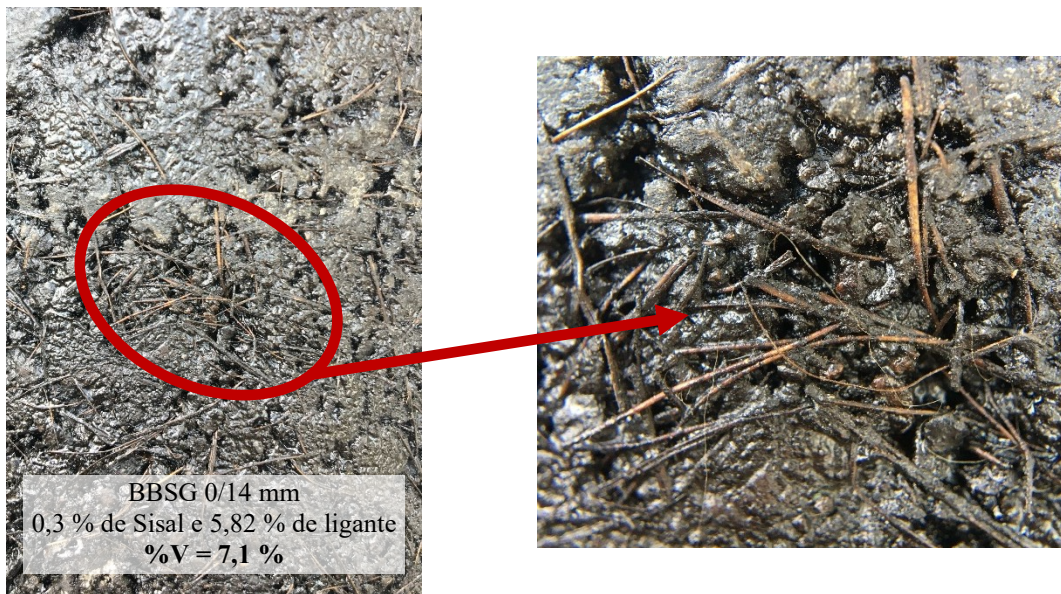
Da mesma forma, na mistura de referência, com 4,86 % de ligante, %V = 8,1 %, enquanto na mistura com 0,3 % de sisal o valor mais próximo a este é obtido com 5,50% de ligante, e na mistura com 0,5 % de sisal o mesmo percentual de vazios é obtido somente com 5,82 % de ligante betuminoso.

Nesse contexto, a tendência verificada indica que as mesmas condições de trabalhabilidade e habilidade de compactação verificadas nas misturas de referência são obtidas, de forma geral, com dois teores de ligante betuminoso a mais para as formulações com 0,3 % de sisal, e três teores de ligante a mais para as misturas com 0,5 % de sisal.

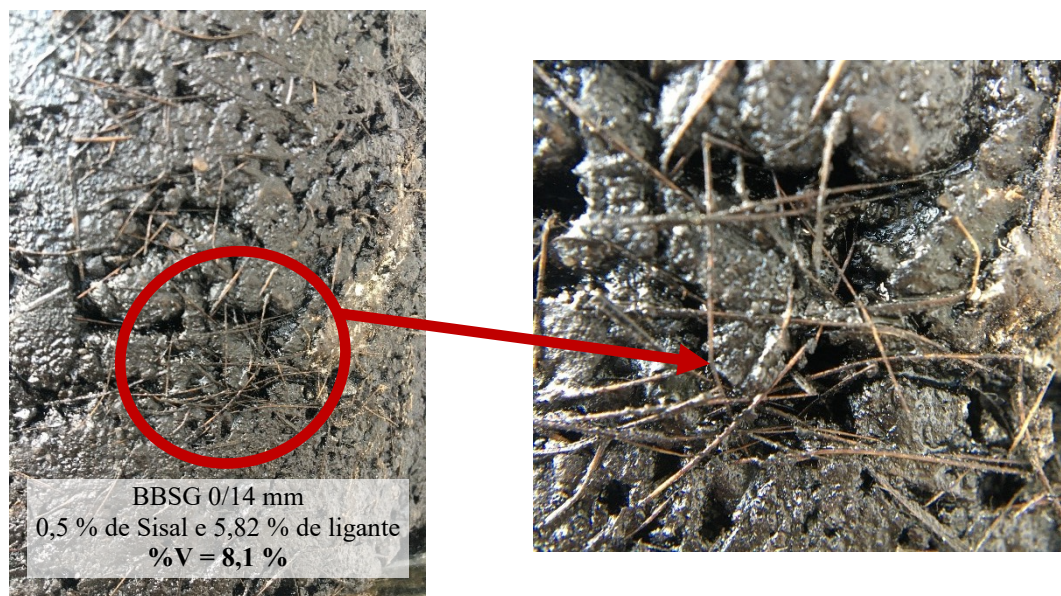
Esse comportamento se justifica pela tendência das fibras em formar tramas volumétricas (Figura 4.5), comportamento que se intensifica durante o processo de usinagem, formando emaranhados de fios de sisal aglutinados com ligante betuminoso (Figura 4.16), que resultam num aumento progressivo do percentual de vazios, e pioram as condições de trabalhabilidade da mistura, demandando um aporte maior de ligante betuminoso para a homogeneização adequada de todas os materiais.

A Figura 5.3 apresenta a progressão do aspecto visual destes emaranhados de sisal na superfície dos corpos de prova após o ensaio na PCG em uma mistura com 0,3 % de sisal, e outra com 0,5 % de sisal, ambas comportando a mesma dosagem de ligante betuminoso.

Figura 5.3 – Aspecto visual da superfície dos corpos de prova pós o ensaio na PCG: emaranhados de fios de sisal (a) numa mistura com 0,3 % de sisal, e (b) numa mistura com 0,5 % de sisal, ambas com 5,82 % de ligante betuminoso.



(a)



(b)

Fonte: Autor.

Da Figura 5.3 infere-se também que um pequeno acréscimo percentual de sisal, da ordem de 0,2 %, resultante da diferença do teor de 0,3 % para 0,5 %, implica experimentalmente e visualmente em uma diferença significativa nas misturas asfálticas testadas. Enquanto no aspecto visual percebe-se claramente a uma evolução das formações volumétricas de sisal entre os granulares, no aspecto experimental esse pequeno incremento de fibra resultou num acréscimo de 1,0 % no percentual de vazios, para o mesmo teor de ligante betuminoso. Essa

diferença sugere um gradiente expressivo na redução da compactidade das misturas testadas, progressivamente ao acréscimo de sisal.

Assim, na perspectiva da habilidade de compactação, a incorporação de fibras de sisal não se mostrou vantajosa, tanto no aspecto técnico, por elevar significativamente o percentual de vazios, quanto no aspecto econômico, por demandar a incorporação de mais ligante betuminoso do que nas misturas de referência para garantir as mesmas condições de trabalhabilidade.

5.2 RESISTÊNCIA À AÇÃO DELETÉRIA DA ÁGUA

No que se refere à resistência à ação deletéria da água, avaliada através do ensaio de Duriez a 18 °C, todas as formulações testadas apresentaram resultados acima do limite mínimo normativo (relação $r/R > 0,7$), indicando, para a condição deste ensaio, boa resistência à ação deletéria da água.

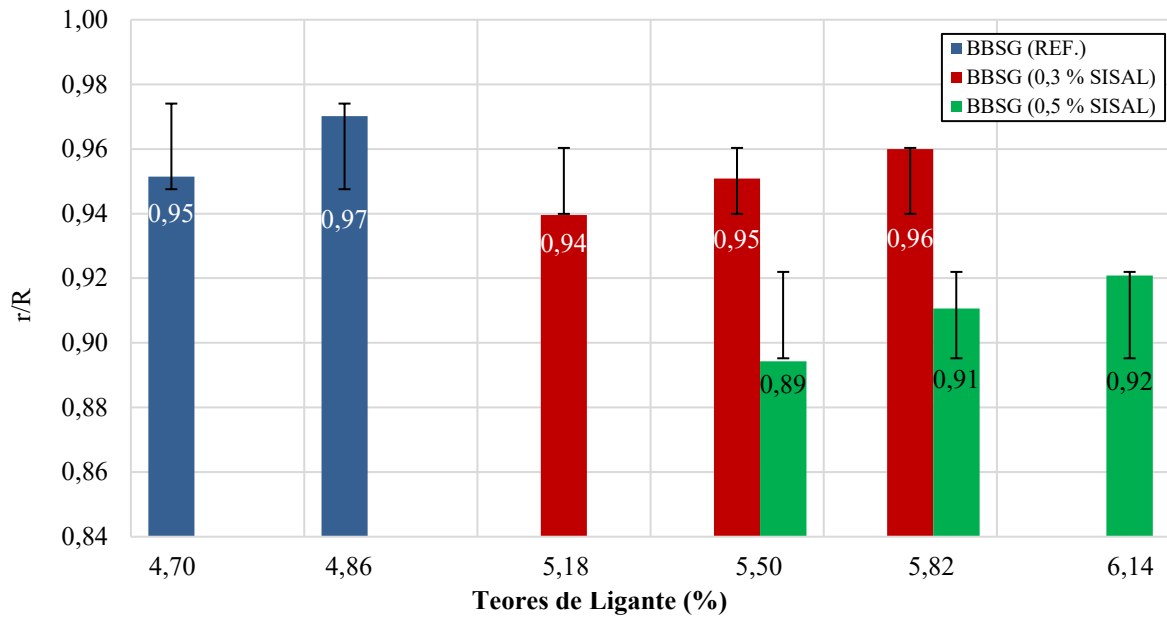
A Tabela 5.2 e a Figura 5.4 apresentam os resultados da relação r/R obtidos a partir da realização de 12 corpos de prova para cada formulação testada.

Tabela 5.2 – Resultados da relação r/R no ensaio de Duriez a 18 °C.

Formulação	Teor de ligante (%)	r/R
BBSG 0/14 mm – Referência (PERSIKE, 2023)	4,70	0,95
	4,86	0,97
BBSG 0/14 mm + 0,3 % de Sisal	5,18	0,94
	5,50	0,95
	5,82	0,96
	5,50	0,89
BBSG 0/14 mm + 0,3 % de Sisal	5,82	0,91
	6,14	0,92

Fonte: Autor.

Figura 5.4 – Resistência à ação deletéria da água nas misturas asfálticas testadas



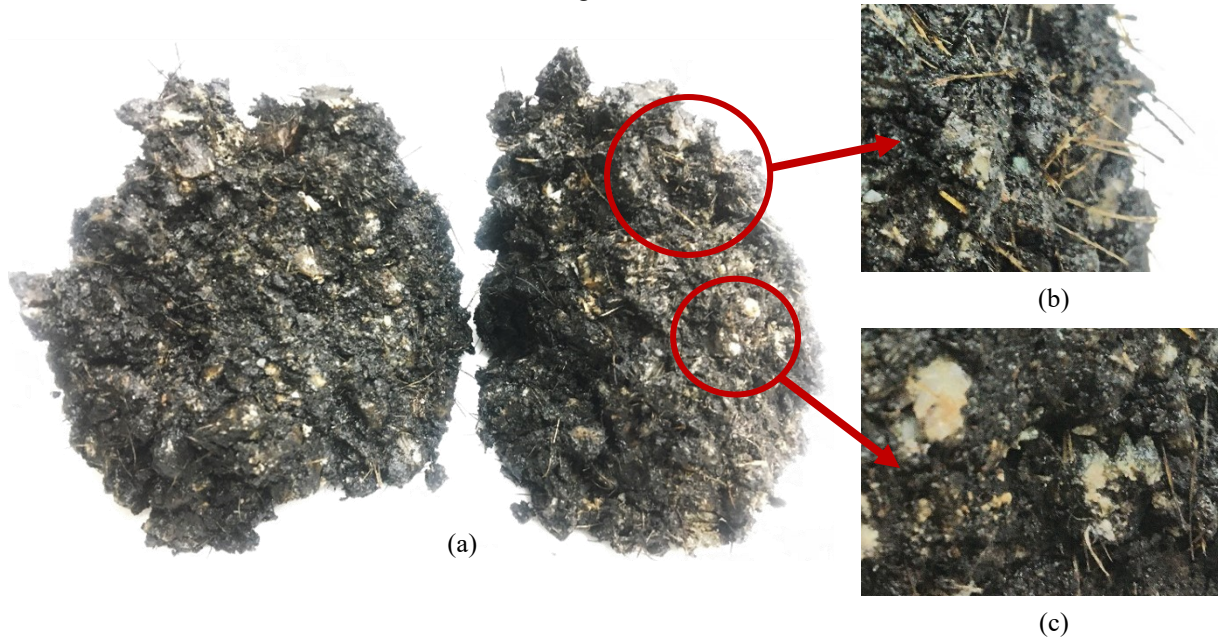
Fonte: Autor.

Percebe-se que a incorporação de sisal implica na redução progressiva da resistência à ação deletéria da água (relação r/R). Isto pode ser atribuído ao aumento do volume de vazios ocasionado pelas tramas de sisal, conforme já discorrido no tópico 5.1, situação que gera mais pontos críticos para penetração da água no interior da mistura, e conseqüentemente um cenário mais agressivo.

Verifica-se também que as formulações com maiores teores de ligante apresentam maior resistência à ação da água, em todas as situações testadas, condição que já era esperada, uma vez da maior disposição de ligante betuminoso para o recobrimento dos granulares e dos fios de sisal, impermeabilizando-os e protegendo-os mais eficientemente da ação da água.

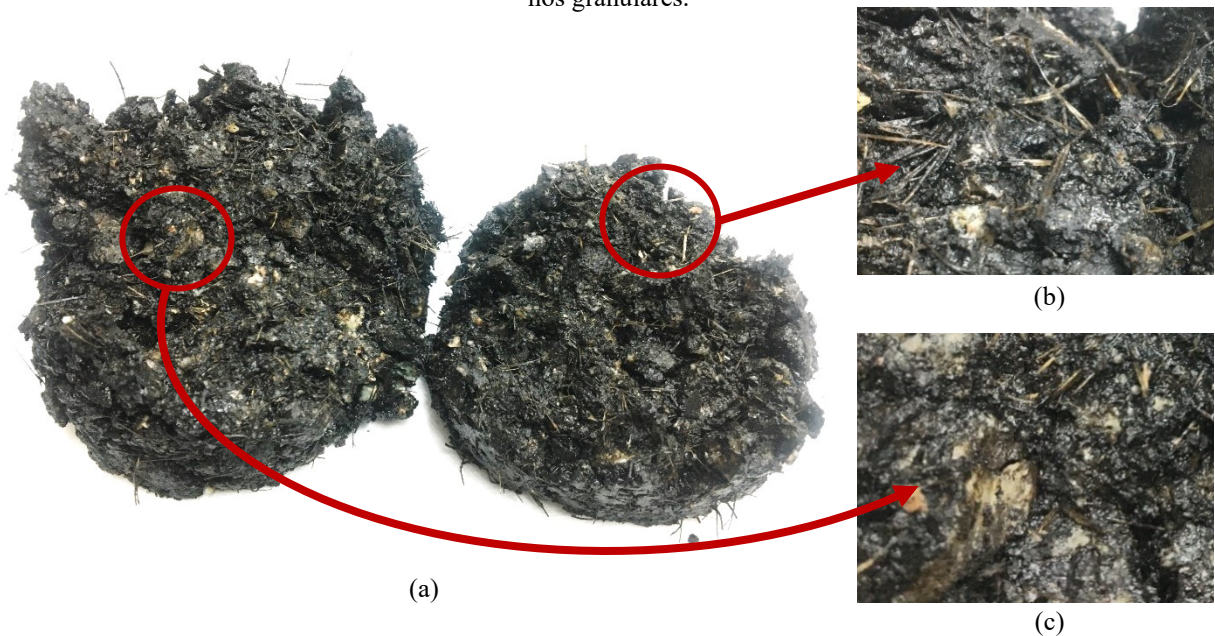
No processo de rompimento dos corpos de prova condicionados em imersão, verificou-se descolamento da película de ligante disposta sobre os fios de sisal (Figuras 5.5b e 5.6b), e também sobre os granulares (Figuras 5.5c e 5.6c), o que se atribui não apenas ao aumento do volume de vazios, mas também à natureza higroscópica dos fios de sisal, que tendem a absorver água no interior de sua estrutura reticular, aumentando o volume (ZHANG *et al.*, 2020), situação que contribui para o rompimento da película de ligante sobre os fios.

Figura 5.5– Corpo de prova do ensaio de Duriez com 0,3 % de sisal e 5,50% de ligante, (a) aberto após o rompimento à compressão simples, apresentando descolamento da película de ligante (b) nos fios de sisal e (c) nos granulares



Fonte: Autor.

Figura 5.6– Corpo de prova do ensaio de Duriez com 0,5 % de sisal e 5,50% de ligante, (a) aberto após o rompimento à compressão simples, apresentando descolamento da película de ligante (b) nos fios de sisal e (c) nos granulares.



Fonte: Autor.

Corroborar-se a este contexto a natureza eletronegativa tanto dos fios de sisal (tópico 4.2.3.1), quanto dos granulares utilizados (tópico 4.2.1), bem como do ligante betuminoso (tópico 4.2.2), ambos compostos majoritariamente por carbono (C), o que não contribui para a

formação de um dipolo elétrico efetivo entre os elementos da mistura, tornando-a mais suscetível à ação da água, sobretudo na perspectiva da adesividade passiva.

Contudo, mesmo que coexistentes todas essas situações, todas as formulações testadas apresentaram boa margem em relação ao limite mínimo normativo. Do ponto de vista experimental, infere-se que as características de condicionamento determinadas para este ensaio, sobretudo a temperatura, não caracterizam um cenário de alta agressividade para as misturas asfálticas, nem mesmo uma situação plenamente condizente com a realidade de campo em países de clima tropical, como o Brasil, onde as temperaturas médias anuais são muito superiores a 18 °C (BARRA, 2009).

Neste contexto, cabe até mesmo supor que caso observadas condições mais críticas para a realização deste ensaio, sobretudo elevando a temperatura de condicionamento dos corpos de prova, os resultados obtidos poderiam não apresentar enquadramento aos limites normativos estabelecidos.

Contudo, atendidos todos os requisitos definidos para este ensaio, conforme Manuel LPC (2007), todas as misturas testadas se mostraram aptas para o nível 2 da metodologia francesa, avaliando a deformação permanente através do afundamento na trilha de roda.

5.3 RESISTÊNCIA À DEFORMAÇÃO PERMANENTE

No que se refere à resistência à deformação permanente avaliada através do afundamento na trilha de roda, a média dos resultados obtidos a partir da realização do ensaio simultâneo de duas placas de cada formulação proposta estão apresentados na Tabela 5.3.

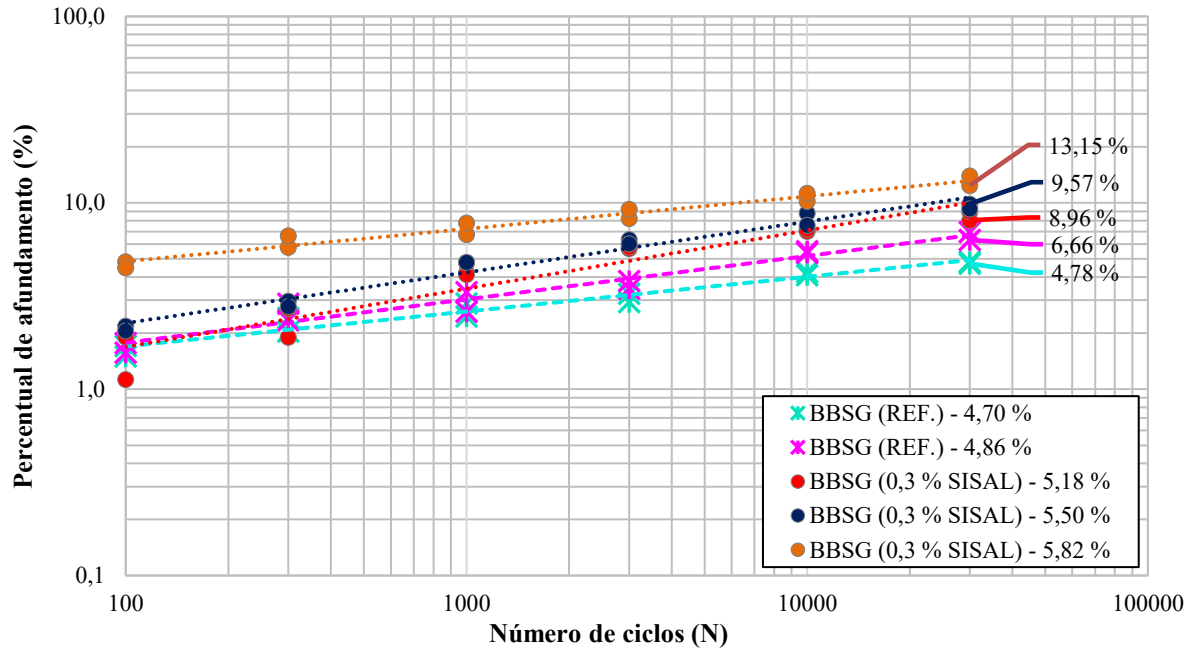
Tabela 5.3 – Afundamento gerado na trilha de roda no ensaio de deformação permanente a 60 °C.

Formulação	Teor de ligante (%)	Afundamento na trilha de roda (%)
BBSG 0/14 mm – Referência (PERSIKE, 2023)	4,70	4,78
	4,86	6,66
BBSG 0/14 mm + 0,3 % de Sisal	5,18	8,51
	5,50	9,57
	5,82	13,15
BBSG 0/14 mm + 0,3 % de Sisal	5,50	7,96
	5,82	9,38
	6,14	10,66

Fonte: Autor.

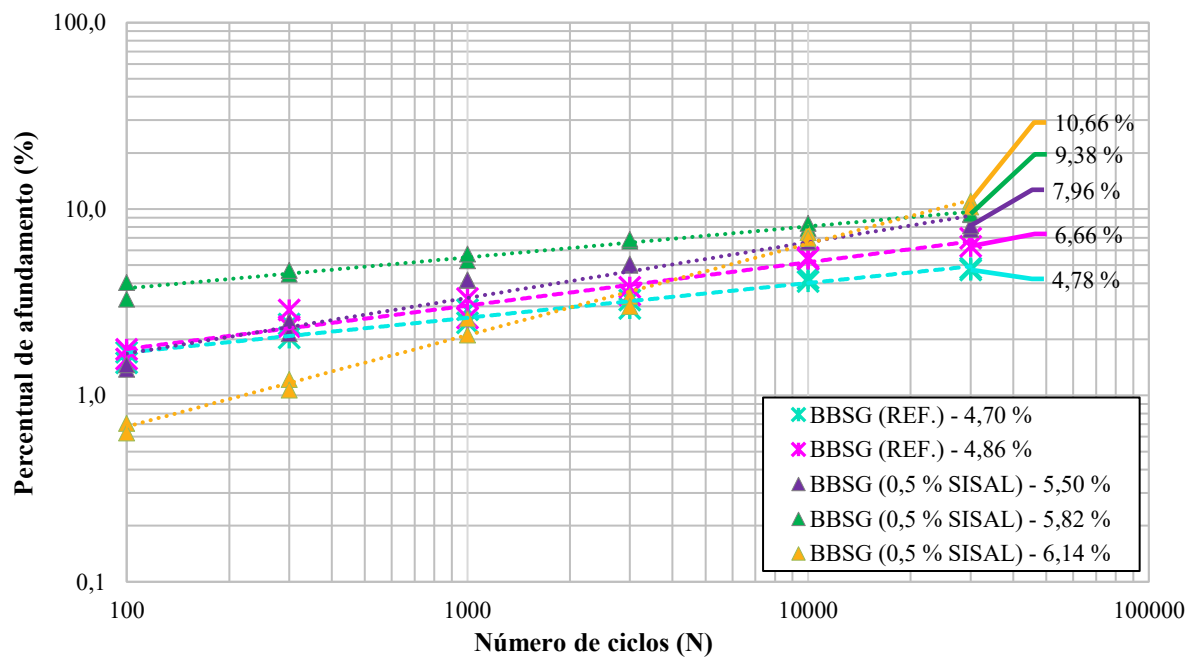
As Figuras 5.7, 5.8 e 5.9 apresentam a evolução visual do percentual de afundamento na trilha de roda nas misturas com 0,3 % e 0,5 % em função do número de ciclos aplicado, comparando-as entre si, e também às misturas de referência.

Figura 5.7 – Afundamento na trilha de roda das misturas com 0,3 % de sisal e das misturas de referência.



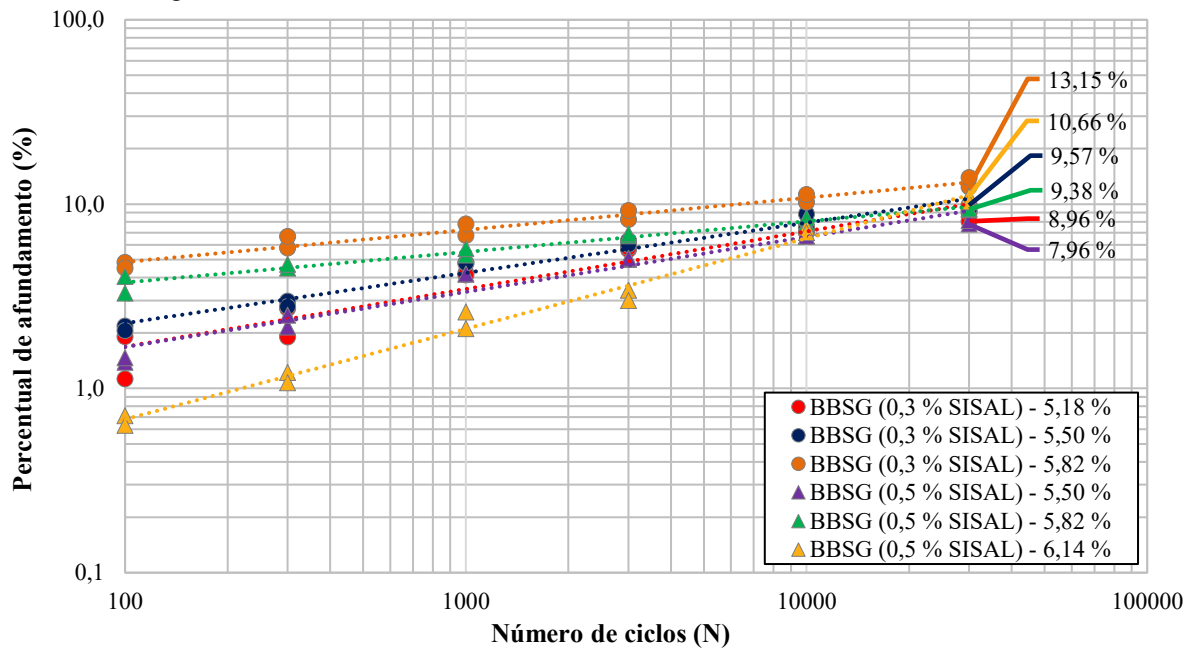
Fonte: Autor.

Figura 5.8 – Afundamento na trilha de roda das misturas com 0,5 % de sisal e das misturas de referência.



Fonte: Autor.

Figura 5.9 – Afundamento na trilha de roda das misturas com 0,3 % e 0,5 % de sisal.



Fonte: Autor.

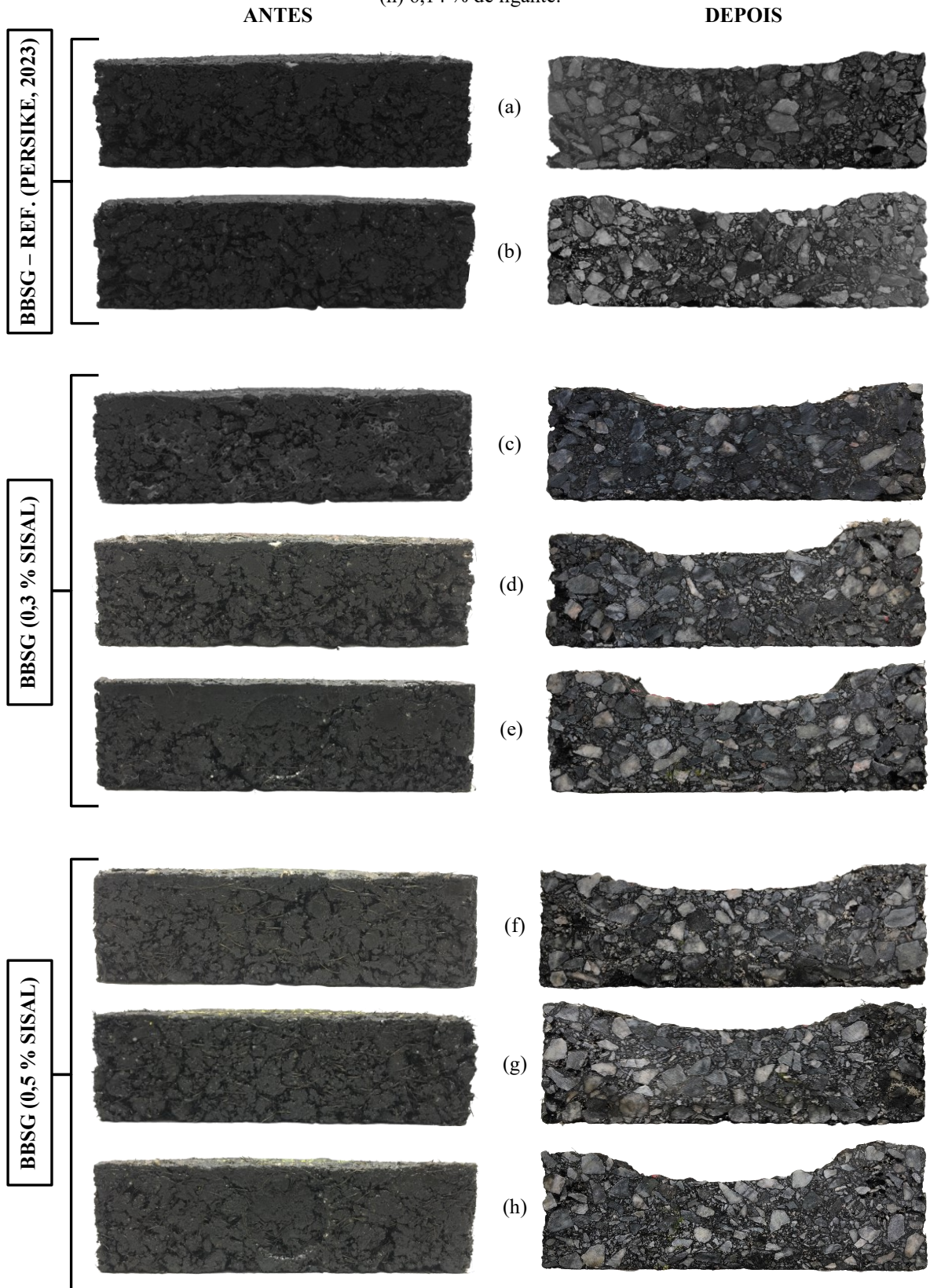
Verifica-se que dentre todas as formulações testadas, apenas a de referência com 4,70 % de teor de ligante alcançou o patamar da Classe 3, a mais nobre para as misturas asfálticas do tipo BBSG, tendo apresentado afundamento na trilha de roda abaixo de 5,0 %, enquanto a dosagem de 4,86 % atingiu a classe intermediária (Classe 2) devido o percentual do afundamento obtido (6,66 %) estar situado entre 5,01 % e 7,50%.

Em contrapartida, todas as formulações que tiveram fibra de sisal incorporadas em suas composições apresentaram afundamentos na trilha de roda superiores a 7,50% e inferiores a 10%, sendo enquadradas na Classe 1, a menos nobre para misturas do tipo BBSG, exceto as dosagens com 5,82 % de ligante e 0,3 % de sisal e 6,14 % de ligante e 0,5 % de sisal, que atingiram percentuais de afundamento na trilha de roda superiores a 10%, não atendendo aos requisitos mínimos da metodologia francesa para este tipo de mistura asfáltica.

Como a suscetibilidade à deformação permanente é diretamente relacionada ao ligante betuminoso contido na dosagem, verifica-se que as misturas de referência apresentam menores percentuais de afundamento na trilha de roda, devido comportarem menores teores de ligante betuminoso em suas dosagens, face à utilização apenas de granulares pétreos na composição granulométrica, com baixa porosidade e, conseqüentemente, absorção (Tabela 4.2).

A Figura 5.10 permite verificar visualmente esta tendência, apresentando a evolução do afundamento na trilha de roda em função do percentual de sisal e dosagem de ligante betuminoso nas formulações testadas, comparativamente às misturas de referência.

Figura 5.10 – Seção transversal das placas de mistura asfáltica antes e depois do ensaio de deformação permanente: mistura de referência com (a) 4,70 % e (b) 4,86 % de ligante; mistura com 0,3 % de sisal e (c) 5,18 %, (d) 5,50 % e (e) 5,82 % de ligante; mistura com 0,5 % de sisal e (f) 5,50 %, (g) 5,82 % e (h) 6,14 % de ligante.



Fonte: Autor.

Entre as misturas asfálticas com a incorporação de sisal, a tendência de apresentar menores percentuais de afundamento na trilha de roda para as dosagens com menor teor de ligante foi mantida (Tabela 5.3), inclusive permitindo que o teor de 5,18 % pudesse ser utilizado na formulação com 0,3 % da referida fibra, haja vista ter demonstrado habilidade de compactação no ensaio da PCG (Tabela 5.1).

Comparando os resultados das formulações com sisal que comportam o mesmo teor de ligante (5,50 % e 5,82 %), percebe-se que há uma redução percentual de afundamento na trilha de roda para aquelas com 0,5 % de sisal, ocasionada pela maior retenção de ligante betuminoso relacionada à maior concentração de fibra em relação a 0,3 %.

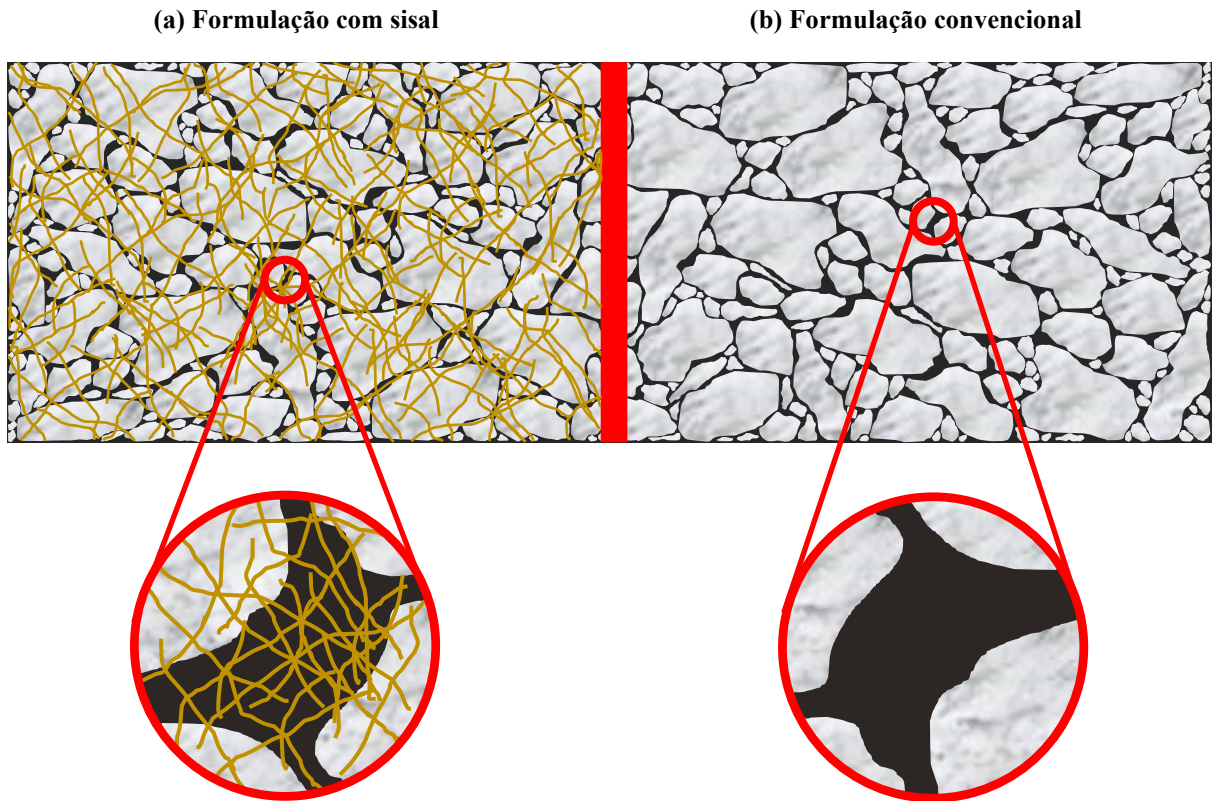
Entretanto, as formulações com 5,82 % de ligante e 0,3 % de sisal e 6,14 % de ligante e 0,5 % de sisal apresentam afundamentos na trilha de roda ligeiramente superiores às demais misturas, o que, nestes casos, as tornam inaptas à aplicação em estruturas de pavimento, de acordo com os critérios especificados pela metodologia francesa (MANUEL LPC, 2007) devido terem apresentado percentual acima de 10 %, máximo exigido para a Classe 1.

Neste contexto, verifica-se que as misturas asfálticas com incorporação de fibra de sisal apresentaram prejuízo no comportamento mecânico quando comparadas às formulações de referência. Observa-se que isto se atribui a dois aspectos principais:

- O sisal incorporado à formulação distribui-se nos interstícios estruturais da mistura asfáltica, alojando-se entre os granulares de maneira esparsa ou em tramas, dificultando ou impedindo do contato grão a grão, e conseqüentemente diminuindo o intertravamento granular e a resistência da mistura asfáltica ao cisalhamento;
- O sisal alojado ente os granulares, em especial as formações em trama, retêm parte do ligante betuminoso livre necessário para estabilização do arranjo granulométrico da mistura asfáltica. Desta forma, se faz necessário o aporte de maiores dosagens de ligante betuminoso para que a mistura atinja a estabilidade adequada. Contudo, o maior aporte de ligante betuminoso aumenta a suscetibilidade térmica da mistura, aumentando o efeito lubrificante entre as partículas, reduzindo a resistência à deformação permanente da mistura asfáltica.

Estes aspectos podem ser esquematicamente visualizados na Figura 5.11.

Figura 5.11 – Representação esquemática dos interstícios estruturais (a) de uma mistura asfáltica com fibra de sisal e (b) de uma mistura asfáltica convencional.

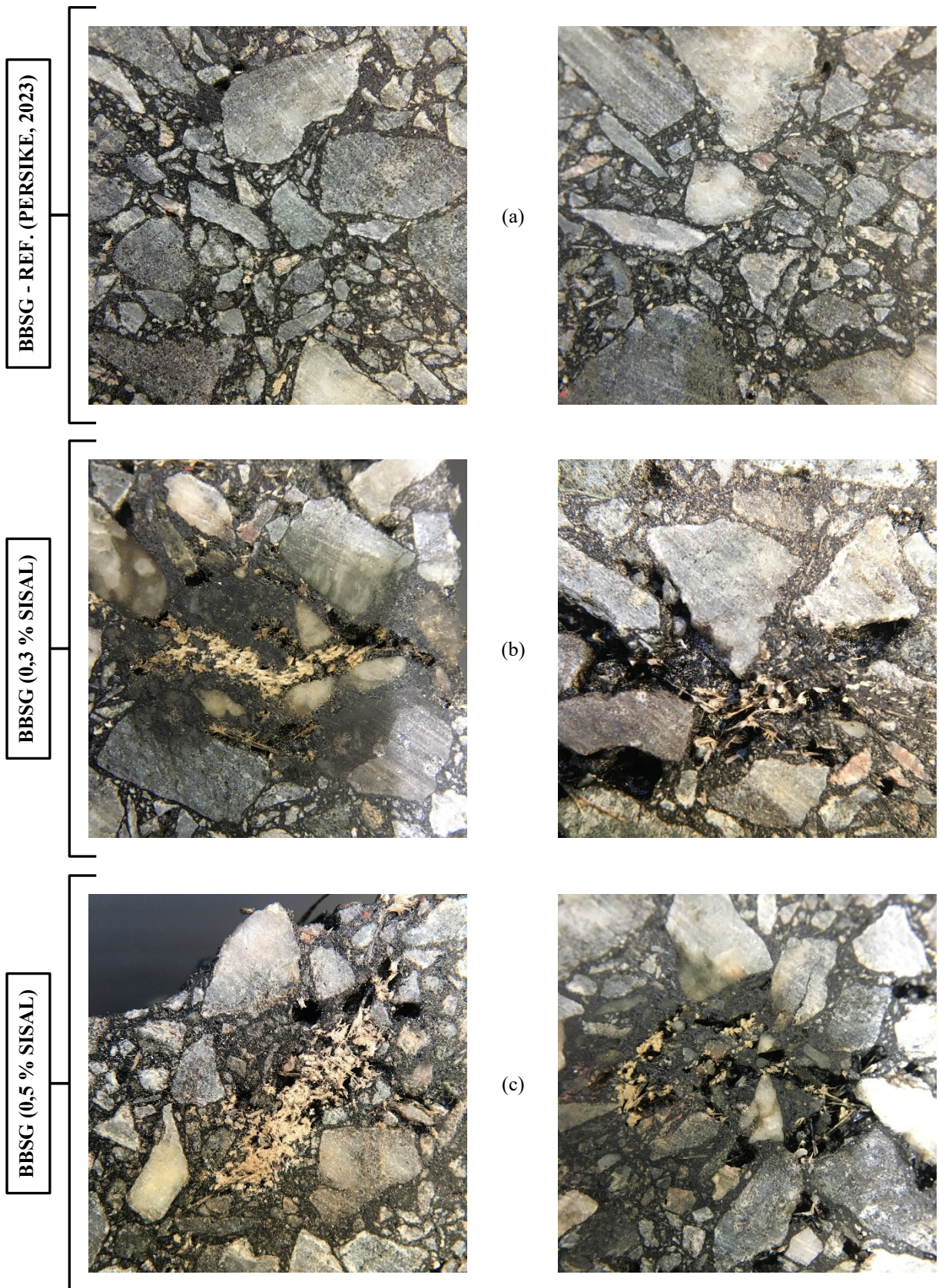


Fonte: Autor.

Da Figura 5.11 verifica-se, à esquerda, as tramas de sisal dificultando o contato intergranular, retendo ligante betuminoso, e por consequência, prejudicando o intertravamento do arranjo granulométrico, e à direita, uma adequada disponibilidade de ligante betuminoso para envolvimento dos granulares e estabilização do arranjo granulométrico da mistura asfáltica.

Estas situações também ficam evidenciadas na Figura 5.12, que apresenta o registro fotográfico ampliado do arranjo granular observado nas seções transversais das formulações convencionais e das formulações com sisal.

Figura 5.12 – Arranjo granulométrico verificado através da seção transversal das misturas asfálticas (a) de referência, (b) com 0,3% de sisal e (c) com 0,5% de sisal.



Fonte: Autor.

Verifica-se na Figura 5.12 alguns dos fenômenos indicados anteriormente, dentre eles:

- Maior concentração de vazios, ocasionada pela presença de sisal, sobretudo em decorrência das formações em trama;
- Redução do contato grão a grão devido à disposição das tramas de sisal nos interstícios estruturais da mistura;
- Retenção de ligante betuminoso nas tramas volumétricas de sisal, bem como nas imediações destas.

Diante de todo o exposto, verifica-se que com relação à resistência ao fenômeno da deformação permanente, as formulações testadas com incorporação de fibra de sisal não apresentaram vantagem em relação às misturas de referência, tanto na perspectiva do comportamento mecânico, por conduzirem a maiores percentuais de afundamento na trilha de roda, quanto na perspectiva financeira, por demandar um aporte maior de ligante betuminoso para que se atinja condições adequadas de estabilidade e trabalhabilidade da mistura asfáltica.

CAPÍTULO 6

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Considerando os resultados da campanha experimental, bem como as discussões técnicas realizadas, conclui-se que foram alcançados integralmente os objetivos definidos para esta pesquisa.

A etapa de caracterização dos materiais utilizados na produção das misturas asfálticas indicou que além da natureza eletronegativa do ligante betuminoso e dos granulares utilizados, as fibras de sisal também apresentam natureza eletronegativa, devido à significativa presença de carbono e oxigênio na composição, situação que dificulta a formação de um dipolo elétrico efetivo entre todos os elementos da mistura, situação que no decorrer dos ensaios realizados também se mostrou como um aspecto contributivo para a diminuição da resistência à ação deletéria da água.

Uma etapa de destaque refere-se à exploração e detalhamento extensivo acerca dos procedimentos de preparação, dosagem e incorporação das fibras de sisal à mistura asfáltica durante o processo de usinagem, bem como os comportamentos característicos observados durante essa etapa da pesquisa. Haja vista este tipo de informação ser pouco explorado na literatura científica sobre o tema, os aspectos relatados nesta pesquisa se mostram de grande relevância para a compreensão mais abrangente e aprofundada do tema, além de embasar a realização de trabalhos futuros.

A incorporação das fibras de sisal à mistura asfáltica durante a usinagem se mostrou como uma etapa crítica, sendo necessário uma série de cuidados e procedimentos específicos, e indica que num possível contexto de aplicação em larga escala deste tipo de mistura, equipamentos específicos devem ser estudados e propostos a fim de atender às necessidades operacionais durante a usinagem deste tipo de mistura asfáltica.

Com relação à avaliação do comportamento funcional, todas as formulações com fibra de sisal testadas se mostraram menos vantajosas do que as misturas de referência nos níveis de avaliação da metodologia francesa.

A tendência das fibras de sisal se aglomerarem em formações em trama, já no processo de usinagem, incorreu no aumento do percentual de vazios e diminuição da trabalhabilidade das misturas, situação que demandou um aporte de maior dosagem de ligante betuminoso para atingir uma condição adequada de compacidade e estabilidade destas.

A incorporação de sisal também se mostrou desvantajosa em relação à resistência à ação deletéria da água, tanto pelo prejuízo no recobrimento dos fios pelo ligante betuminoso em razão da natureza eletronegativa de ambos, quanto pelo comportamento higroscópico dessa fibra, que tende a absorver água no interior de sua estrutura reticular, expandindo seu volume, e rompendo a película de ligante sobre os fios. Além disso, a ação da água sobre estas misturas também é potencializada pela formação de pequenos emaranhados de fibra na superfície dos corpos de prova, que facilitam a penetração de água no interior destas misturas.

O somatório de todas essas características também resultou numa condição de menor resistência ao fenômeno de deformação permanente para as formulações com sisal, comparado às misturas de referência. A presença desta fibra entre os granulares, sobretudo as formulações em trama, reduzem o contato intergranular, prejudicando o intertravamento do arranjo granulométrico e diminuindo a resistência ao cisalhamento da mistura asfáltica.

Concomitantemente, a necessidade de maior dosagem de ligante betuminoso para obtenção de condições adequadas de trabalhabilidade na mistura também aumentou a suscetibilidade térmica desta, acentuando o efeito lubrificante do ligante sobre os granulares, e consequentemente conduzindo a maiores percentuais de afundamento na trilha de roda para as formulações com fibra de sisal.

Misturas asfálticas do tipo BBSG são destinadas à camada de rolamento do pavimento, e, portanto, devem prover boas condições de segurança e conforto ao usuário, apresentando uma boa resistência à deformação permanente, e garantindo a impermeabilização da estrutura do pavimento, através de uma boa resistência à ação da água. Além disso, a condição visada num projeto de pavimento é sempre atender a trilogia de requisitos básicos: conforto, segurança e economia.

Neste contexto, conclui-se que as misturas asfálticas com incorporação de fibra de sisal testadas nesta pesquisa não se mostraram vantajosas nestes critérios, apresentando menor resistência à ação deletéria da água e maiores afundamentos percentuais na trilha de roda do que as misturas de referência, além de demandar maiores dosagens de ligante betuminoso, que é a fração mais onerosa da composição.

Sugere-se, para trabalhos futuros, realizar a avaliação dos níveis fundamentais da metodologia francesa para o mesmo tipo de formulação (ainda que esta seja de caráter funcional), com o objetivo de ampliar a compreensão acerca do impacto que as fibras de sisal demandam sobre o módulo complexo e resistência à fadiga destas misturas.

Sugere-se também realizar uma análise de incerteza dos resultados obtidos, utilizando métodos de propagação de erro e/ou aplicação de uma distribuição de probabilidade contínua, com a distribuição de Weibull, para verificar possíveis tendências que esse tratamento pode sugerir para a condição analisada, em específico, para o contexto das fibras de sisal.

Contudo, é pertinente ressaltar também que os resultados apresentados nesta pesquisa referem-se à incorporação de fibras de sisal em uma mistura asfáltica de graduação densa, cuja condição original já apresenta uma curva granulométrica contínua, com bom intertravamento granular e conseqüentemente demandando menores dosagens de ligante betuminoso para condições convencionais.

Tendências diferentes das observadas nesta pesquisa podem ser verificadas para uma situação de estudo em misturas com outras composições granulométricas, sobretudo em formulações com graduação mais aberta, que originalmente necessitem de dosagens maiores de ligante, haja vista o potencial observado das fibras de sisal reterem eficientemente parte do ligante betuminoso em excesso.

Desta forma, o conjunto de resultados obtidos e informações descritas neste trabalho se apresenta como um subsídio consistente para a realização de trabalhos futuros nesta área do conhecimento, recomendando-se, neste contexto, a realização de pesquisas complementares com outros tipos de formulações, como supramencionado, de forma a verificar possíveis situações em que a incorporação de fibra de sisal se mostre vantajosa, tanto na perspectiva mecanicista, quanto nos aspectos econômico e funcional.

REFERÊNCIAS

AASHTO T 283 (2014), Resistance of Compacted Asphalt Mixtures to Moisture-Induced Damage. American Association of State Highway and Transportation Officials. Washington, DC.

AASHTO T 305 (1997), Determination of Draindown Characteristics in Uncompacted Asphalt Mixtures. American Association of State Highway and Transportation Officials. Washington, DC.

AASHTO TP 79 (2015), Determining the Dynamic Modulus and Flow Number for Asphalt Mixtures Using the Asphalt Mixture Performance Tester (AMPT). American Association of State Highway and Transportation Officials. Washington, DC.

ABNT NBR 10004 (2004), Resíduos sólidos – Classificação. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Brasília, DF.

AFNOR NF EN 12697-12 (2018), Mélanges bitumineux - Méthodes d'essai - Partie 12: Détermination de la sensibilité à l'eau des éprouvettes bitumineuses. Norme Européene, Association Française de Normalisation. Paris, France.

AFNOR NF EN 12697-22 (2020), Mélanges bitumineux - Méthodes d'essai - Partie 22: Essai d'orniérage. Norme Européene, Association Française de Normalisation. Paris, France.

AFNOR NF EN 12697-31 (2019), Mélanges bitumineux - Méthodes d'essai - Partie 31: Confection d'éprouvettes à la presse à compactage giratoire. Norme Européene, Association Française de Normalisation. Paris, France.

AGRIC POINT. Sisal farming guide: understanding production of sisal. Understanding production of sisal. 2021. Disponível em: <https://agricpoints.com/sisal-farming-guide-understanding-production/>. Acesso em: 02 mar. 2023.

AKHIL, N.; RAMU, Penki; SHETTY, Shivashankar Kalyan. Experimental investigations on the rut resistant surface layer with Inclusion of Marble Dust and Sisal Fibers. *Materials Today: Proceedings*, [S.L.], v. 18, p. 3233-3246, 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.matpr.2019.07.199>.

ALZIOUD, Mahmoud; ABBAS, Ala; HUANG, Qindan. Effect of traffic monitoring period on mechanistic-empirical pavement design. *Construction And Building Materials*, [S.L.], v. 360, p. 129584, dez. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129584>.

ANDRADE, Viviane Dias et al. Impacto da formulação de composições granulométricas nas propriedades mecânicas e funcionais de misturas asfálticas densas. *Matéria (Rio de Janeiro)*, [S.L.], v. 25, n. 4, p. 12905, 2020. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1517-707620200004.1205>.

ANDRADE, Viviane Dias. Influência da formulação de esqueletos minerais na deformação permanente de misturas de concreto asfáltico densas. 2018. 169 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciências Mecânicas, Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, SC, 2018.

ARAUJO, Maria de Fátima Amazonas de Sá et al. Weathering aging of modified asphalt binders. *Fuel Processing Technology*, [S.L.], v. 115, p. 19-25, nov. 2013. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuproc.2013.03.029>.

ASTM D6927 (2015), Method for Marshall Stability and Flow of Asphalt Mixtures. American Society for Testing and Materials. Washington, DC.

AYASRAH, Usama B. et al. Development of a temperature prediction model for flexible pavement structures. *Case Studies In Construction Materials*, [S.L.], v. 18, p. 01697, jul. 2023. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01697>.

BAHJA, B. et al. Morphological and structural analysis of treated sisal fibers and their impact on mechanical properties in cementitious composites. *Journal Of Building Engineering*, [S.L.], v. 34, p. 102025, fev. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jobbe.2020.102025>.

BARRA, Breno Salgado. Avaliação da ação da água no módulo complexo e na fadiga de misturas asfálticas densas. 2009. 363 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2009.

BARRA, Breno Salgado. Avaliação do desempenho mecânico de misturas asfálticas densas utilizando materiais do estado do Pará com o emprego de pó de calcário. 2005. 202 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005.

BASSYOUNI, M. Dynamic mechanical properties and characterization of chemically treated sisal fiber-reinforced polypropylene biocomposites. *Journal Of Reinforced Plastics And Composites*, [S.L.], v. 37, n. 23, p. 1402-1417, 7 set. 2018. SAGE Publications. <http://dx.doi.org/10.1177/0731684418798049>.

BEKELE, Abera E.; LEMU, Hirpa G.; JIRU, Moera G.. Experimental study of physical, chemical and mechanical properties of enset and sisal fibers. *Polymer Testing*, [S.L.], v. 106, n. 1, p. 1-7, dez. 2021. Mensal. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2021.107453>.

BOURSICAUD, Vinciane Le. Nouvelles utilisations des mesures de bassins de déflexion pour caractériser l'état structurel des chaussées. 2018. 314 f. Tese (Doutorado) - Curso de Génie Civil, École Centrale de Nantes, Nantes, Fr, 2018. Disponível em: <https://theses.hal.science/tel-01963303>. Acesso em: 26 fev. 2023.

BRASIL. Portaria nº 71/1983, de 16 de março de 1983. Aprovar as presentes Normas de Identidade, Qualidade, Apresentação e Embalagem da Fibra Beneficiada de Sisal ou Agave e seus Resíduos de Valor Econômico, nos termos do documento anexo, devidamente assinadas pelo Secretário Nacional de Abastecimento. Portaria Nº 71, de 16 de Março 1983. Brasília (DF), Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Disponível em: <https://sistemasweb.agricultura.gov.br/sislegis/action/detalhaAto.do?method=visualizarAtoPortalMapa&chave=571046430>. Acesso em: 02 mar. 2023.

CADORIN, Natália Dell'Antonio et al. Asphalt nanocomposite with titanium dioxide: mechanical, rheological and photoactivity performance. *Construction And Building Materials*, [S.L.], v. 289, p. 123178, jun. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123178>.

CAO, Liping et al. Optimized formulation of asphalt compound containing bio-oil and shredded rubber. *Journal Of Cleaner Production*, [S.L.], v. 378, p. 134591, dez. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.134591>.

CARDOSO, Milena Soares. Panorama tecnológico de uso de resíduos do sisal. *Semioses*, [S.L.], v. 13, n. 3, p. 13-23, 24 set. 2019. Sociedade Unificada de Ensino Augusto Motta - UNISUAM. <http://dx.doi.org/10.15202/1981996x.2019v13n3p13-23>.

CAVALCANTE, Gustavo Teotônio de Oliveira; ALMEIDA, Hermes Alves de. Diagnóstico socioambiental do cultivo do sisal (*agave ssp*) no recorte territorial de Pocinhos, PB. *Conjecturas*, [S.L.], v. 22, n. 8, p. 1092-1104, 27 jul. 2022. Uniao Atlantica de Pesquisadores. <http://dx.doi.org/10.53660/conj-1308-y08>.

CHEN, Yunhao et al. In-situ and numerical investigation on dynamic response of asphalt pavement-low slag embankment system under traffic loading. *Transportation Geotechnics*, [S.L.], v. 37, p. 100884, nov. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.trgeo.2022.100884>.

CHU, Xuanxuan et al. Sustainable pavement drainage systems: subgrade moisture, subsurface drainage methods and drainage effectiveness. *Construction And Building Materials*, [S.L.], v. 364, p. 129950, jan. 2023. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129950>.

CIESIELSKI, Peter N. et al. Advances in Multiscale Modeling of Lignocellulosic Biomass. *Acs Sustainable Chemistry & Engineering*, [S.L.], v. 8, n. 9, p. 3512-3531, 13 fev. 2020. American Chemical Society (ACS). <http://dx.doi.org/10.1021/acssuschemeng.9b07415>.

CIMBETON. Voiries et aménagements urbains en béton: conception et dimensionnement: Collection Technique Cimbéton, Paris, France, 2019. 125 p. Tomo 1.

CLARA, Estéfani. Avaliação de misturas asfálticas densas com a incorporação de cinza de carvão mineral. 2020. 170 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciências Mecânicas, Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2020.

DALHEIMER, Bernhard; HERWARTZ, Helmut; LANGE, Alexander. The threat of oil market turmoils to food price stability in Sub-Saharan Africa. *Energy Economics*, [S.L.], v. 93, n. 1, p. 1-23, jan. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2020.105029>.

DHANDAPANI, Bhuvana Priya; MULLAPUDI, Ramya Sri. Design and performance characteristics of cement grouted bituminous mixtures - a review. *Construction And Building Materials*, [S.L.], v. 369, p. 130586, mar. 2023. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.130586>.

DIAS, Antonivalda Tosta. Valorização dos resíduos do sisal: uma proposta para a região do simiárido do estado da Bahia. 2009. 104 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Estadual de Feira de Santana, Feira de Santana, BA, 2009.

DIAS, Fabio de S. et al. Lignocellulosic materials as adsorbents in solid phase extraction for trace elements preconcentration. *Trac Trends In Analytical Chemistry*, [S.L.], v. 158, p. 116891, jan. 2023. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.trac.2022.116891>.

DNER-ME 043 (1995), Misturas Betuminosas a Quente – Ensaio Marshall. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Brasília, DF.

DNIT-ME 135 (2018), Pavimentação asfáltica - Misturas asfálticas - Determinação do módulo de resiliência. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Brasília, DF.

DNIT-ME 136 (2018), Pavimentação asfáltica – Misturas asfálticas – Determinação da resistência à tração por compressão diametral. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Brasília, DF.

DYER, Paulo P.O.L.; LIMA, Maryangela Geimba de. Waste foundry sand in hot mix asphalt: a review. *Construction And Building Materials*, [S.L.], v. 359, p. 129342, dez. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129342>.

EMBRAPA (Brasil) (comp.). Território do Sisal: Cultivos. 2021a. Disponível em: <https://www.embrapa.br/en/agencia-de-informacao-tecnologica/territorios/territorio-sisal/atividades-economicas/cultivos>. Acesso em: 02 mar. 2023.

EMBRAPA (Brasil) (comp.). Território do Sisal: Sisal. 2021b. Disponível em: <https://www.embrapa.br/en/agencia-de-informacao-tecnologica/territorios/territorio-sisal/atividades-economicas/cultivos/sisal>. Acesso em: 02 mar. 2023.

EMBRAPA (Brasil) (comp.). Território do Sisal: população. População. 2021c. Disponível em: <https://www.embrapa.br/en/agencia-de-informacao-tecnologica/territorios/territorio-sisal/carcateristicas-do-territorio/populacao>. Acesso em: 02 mar. 2023.

EMBRAPA (Brasil) (comp.). Sisal (agave sisalana, Perrine): tecnologias de plantio e utilização. Campina Grande: Vicente de Paula Queiroga, Odilon Reny Ribeiro Ferreira da Silva, José da Cunha Medeiros, Camilo Flamarion de Oliveira Franco, 2021d. 219 p.

EMBRAPA. Sisal: pós-colheita. Pós-colheita. 2021e. Disponível em: <https://www.embrapa.br/en/agencia-de-informacao-tecnologica/cultivos/sisal/producao/pos-colheita>. Acesso em: 02 mar. 2023.

EN 12697-26 (2004), Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 26: Stiffness. European Committee for Standardization, Brussels, BE.

FAGUNDES, Priscilla Meurer. Avaliação do comportamento funcional de misturas asfálticas do tipo BBDr e BBTM. 2020. 136 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciências Mecânicas, Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, SC, 2020.

FANG, Mingjing et al. Design, application and performance improvement of Eco-Permeable pavement materials (Eco-PPMs): a review. *Construction And Building Materials*, [S.L.], v. 360, p. 129558, dez. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129558>.

FAO. United Nations. Sisal. 2023. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Disponível em: <https://www.fao.org/economic/futurefibres/fibres/sisal/en/>. Acesso em: 02 mar. 2023.

FARIA, Mário Marcos de Santana et al. Composição bromatológica do co-produto do desfibramento do sisal tratado com uréia. *Revista Brasileira de Zootecnia*, [S.L.], v. 37, n. 3, p. 377-382, mar. 2008. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1516-35982008000300001>.

FWA, T.F.. Determination and prediction of pavement skid resistance—connecting research and practice. *Journal Of Road Engineering*, [S.L.], v. 1, p. 43-62, dez. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jreng.2021.12.001>.

GAUDENZI, Elena et al. The use of lignin for sustainable asphalt pavements: a literature review. *Construction And Building Materials*, [S.L.], v. 362, p. 129773, jan. 2023. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129773>.

GOÉS, Márcio de Sousa. Ferritas $Mg_{1-\delta}Zn_{\delta}Fe_2O_4$ obtidas por síntese de reação de combustão: caracterização estrutural e nanoestrutural. 2006. 79 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de Materiais, Universidade Estadual Paulista, Araraquara, 2006.

GUO, Meng et al. Effect of aging, testing temperature and relative humidity on adhesion between asphalt binder and mineral aggregate. *Construction And Building Materials*, [S.L.], v. 363, p. 129775, jan. 2023. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129775>.

GUTIÉRREZ, Ana; RODRÍGUEZ, Isabel M.; RÍO, José C. del. Chemical composition of lipophilic extractives from sisal (*Agave sisalana*) fibers. *Industrial Crops And Products*, [S.L.], v. 28, n. 1, p. 81-87, jul. 2008. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.indcrop.2008.01.008>.

IDRRIM, Institut Des Routes Des Rues Et Des Infrastructures Pour La Mobilité. Choix et mise en oeuvre des couches de surface dans les zones soumises à des conditions climatiques hivernales rigoureuses. 43. ed. Paris, France: IDRRIM, 2020. 20 p. Note d'information. Disponível em: <https://www.idrrim.com/publications/8122.htm>. Acesso em: 02 mar. 2023.

IFSTTAR (França). Rapport d'activité 2019. 2019. ed. Paris: Université Gustave Eiffel, 2020. 74 p.

INFO. International Natural Fiber Organization. Sisal. 2023. Disponível em: https://naturalfibersinfo.org/?page_id=86. Acesso em: 02 mar. 2023.

JIANG, Qi et al. Comprehensive assessment of the durability deterioration of asphalt pavement in salt environment: a literature review. *Case Studies In Construction Materials*, [S.L.], v. 17, p. 01706, dez. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01706>.

KAR, Debashish; GIRI, Jyoti Prakash; PANDA, Mahabir. Performance Evaluation of Bituminous Paving Mixes Containing Sisal Fiber as an Additive. *Transportation Infrastructure Geotechnology*, [S.L.], v. 6, n. 3, p. 189-206, 16 maio 2019. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s40515-019-00079-6>.

KARAHANÇER, Şebnem et al. Investigating the utility of sisal in hot mix asphalt as a fiber. *Mühendislik Bilimleri Ve Tasarım Dergisi*, [S.L.], v. 7, n. 4, p. 906-912, 19 dez. 2019. *Muhendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*. <http://dx.doi.org/10.21923/jesd.553502>.

KIKUKAWA, Nobuyuki et al. Synthesis and magnetic properties of nanostructured spinel ferrites using a glycine–nitrate process. *Journal Of Magnetism And Magnetic Materials*, [S.L.], v. 284, p. 206-214, dez. 2004. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmmm.2004.06.039>.

KUMAR, N.L.N. Kiran; RAVITHEJA, A.. Characteristics of stone matrix asphalt by using natural fibers as additives. *Materials Today: Proceedings*, [S.L.], v. 19, n. 1, p. 397-402, ago. 2019. Mensal. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.matpr.2019.07.624>.

LCPC, Laboratoire Central Des Ponts Et Chaussées. Conception et dimensionnement des structures de chaussée: guide technique. Nantes: Setra, 1994. 260 p.

LCPC. Bulletin des laboratoires des Ponts et Chaussées: numéro spécial - adhérence. 255. ed. Nantes: Laboratoire Central Des Ponts Et Chaussées, 2005. 197 p. (255).

LCPC, Laboratoire Central Des Ponts Et Chaussées. Guide technique des compactage des enrobés hydrocarbonés à chaud. Nantes, Paris: IFSTTAR, 2014. 82 p. Disponível em: https://www.ifsttar.fr/fileadmin/user_upload/editions/lcpc/guidetechnique/guidetechnique-lcpc-compacten.pdf. Acesso em: 02 mar. 2023.

LI, Jiange et al. Investigation on internal mechanical response of asphalt mixture during creep test utilizing the Smart Aggregate. *Construction And Building Materials*, [S.L.], v. 349, p. 128800, set. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128800>.

LI, Yuanyuan et al. Review of ultraviolet ageing mechanisms and anti-ageing methods for asphalt binders. *Journal Of Road Engineering*, [S.L.], v. 2, n. 2, p. 137-155, jun. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jreng.2022.04.002>.

LU, Dai Xuan et al. Future recyclability of hot mix asphalt containing recycled plastics. *Construction And Building Materials*, [S.L.], v. 368, p. 130396, mar. 2023. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.130396>.

LV, Yang et al. Performance and VOCs emission inhibition of environmentally friendly rubber modified asphalt with UiO-66 MOFs. *Journal Of Cleaner Production*, [S.L.], v. 385, p. 135633-130586, jan. 2023. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.135633>.

M. & W. HELLER. Aplicaciones del sisal. 2023. Disponível em: <https://www.mwheller.de/es/el-sisal/sisal-anwendungen>. Acesso em: 02 mar. 2023.

MACIEJEWSKI, Krzysztof et al. Effects of water-foaming and liquid warm mix additive on the properties and chemical composition of asphalt binders in terms of short term ageing

process. *Construction And Building Materials*, [S.L.], v. 341, p. 127756, jul. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127756>.

MANIAN, Avinash P.; CORDIN, Michael; PHAM, Tung. Extraction of cellulose fibers from flax and hemp: a review. *Cellulose*, [S.L.], v. 28, n. 13, p. 8275-8294, 12 jul. 2021. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s10570-021-04051-x>.

MANUEL LPC. Laboratoire Central Des Ponts Et Chaussées Lcpc. Manuel LPC d'aide à la formulation des enrobés. Paris: Laboratoire Central Des Ponts Et Chaussées, 2007. Groupe de Travail RST "Formulation des enrobés".

MARTIN, Adriana R. et al. Caracterização química e estrutural de fibra de sisal da variedade Agave sisalana. *Polímeros*, [S.L.], v. 19, n. 1, p. 40-46, 2009. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s0104-14282009000100011>.

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

MELO, Kátia Moreira de. Resíduo de sisal: uma alternativa sustentável como reforço particulado em compósito polimérico com adição de agente silano. 2022. 48 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Têxtil, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2022.

MENAPACE, Ilaria; YIMING, Wubulikasimu; MASAD, Eyad. Chemical analysis of surface and bulk of asphalt binders aged with accelerated weathering tester and standard aging methods, [S.L.], v. 202, p. 366-379, ago. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2017.04.042>.

MINISTÈRE DE L'EQUIPEMENT, DES TRANSPORTS ET DU LOGEMENT (France). Lettre-circulaire du 26 octobre 1998 concernant l'application du catalogue des structures types de chaussées neuves (non publiée au bulletin officiel). Direction Des Routes. Paris, France, 26 out. 1998.

MINISTÉRIO DA INFRAESTRUTURA (Brasil). PNL 2035: plano nacional de logística. Brasília: Empresa de Planejamento e Logística, 2022. 216 p. Disponível em: https://www.gov.br/infraestrutura/pt-br/assuntos/politica-e-planejamento/politica-e-planejamento/RelatorioExecutivoPNL_2035final.pdf. Acesso em: 02 mar. 2023.

MWAIKAMBO, Leonard Y.; ANSELL, Martin P.. Chemical modification of hemp, sisal, jute, and kapok fibers by alkalization. *Journal Of Applied Polymer Science*, [S.L.], v. 84, n. 12, p. 2222-2234, 2 abr. 2002. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1002/app.10460>.

NIAN, Tengfei et al. Mechanical response of interlayer structural shear performance of asphalt pavement with functional layer considering interlayer contact state. *Case Studies In Construction Materials*, [S.L.], v. 18, p. 01934, jul. 2023. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e01934>.

OLIVEIRA, Jardel Andrade de. Avaliação do impacto da metodologia FAD-CI de seleção granulométrica na vida de fadiga de misturas asfálticas. 2019. 110 f. Tese (Doutorado) - Curso de Curso de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE, 2019.

PEREIRA, Paulo; PAIS, Jorge. Main flexible pavement and mix design methods in Europe and challenges for the development of an European method. *Journal Of Traffic And Transportation Engineering (English Edition)*, [S.L.], v. 4, n. 4, p. 316-346, ago. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jtte.2017.06.001>.

PERSIKE, Thiago. Avaliação da resistência à deformação permanente de misturas asfálticas densas com incorporação de resíduos de construção e demolição. 2023. 118 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciências Mecânicas, Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2023.

PESSOA JR., Elci. Manual de obras rodoviárias e pavimentação urbana. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2019. 221 p.

PRANJIC, Ivana et al. Influence of pavement surface macrotexture on pavement skid resistance. *Transportation Research Procedia*, [S.L.], v. 45, p. 747-754, 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.trpro.2020.02.102>.

QUINTANILHA-PEIXOTO, Gabriel et al. The Sisal Virome: uncovering the viral diversity of agave varieties reveals new and organ-specific viruses. *Microorganisms*, [S.L.], v. 9, n. 8, p. 1704, 10 ago. 2021. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/microorganisms9081704>.

RADETIĆ, Maja. Functionalization of textile materials with TiO₂ nanoparticles. *Journal Of Photochemistry And Photobiology C: Photochemistry Reviews*, [S.L.], v. 16, p. 62-76, set. 2013. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jphotochemrev.2013.04.002>.

RAMALINGAM, S.; MURUGASAN, R.; NAGABHUSHANA, M.N.. Laboratory performance evaluation of environmentally sustainable sisal fibre reinforced bituminous mixes. *Construction And Building Materials*, [S.L.], v. 148, p. 22-29, set. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.05.006>.

RAZAH, Mustafa Musleh; CHOPRA, Avani. A review of using sisal fiber and coir fiber as additives in stone matrix asphalt. *International Research Journal Of Engineering And Technology*, [S.L.], v. 7, n. 2, p. 1692-1697, fev. 2020.

REPLAN (PETROBRAS). Certificado de ensaio – cópia. n. 1700-2018. Produto Cimento Asfáltico CAP 30/45. 2018.

ROCHA, Jorcelan Pereira da; FERREIRA, Lucas Galvão Cunha Monteiro; BORBA, Fernando Vasconcelos. Diagnóstico de patologias encontradas em pavimentos rodoviários flexíveis e semirrígidos. *Enciclopédia Biosfera*, [S.L.], v. 16, n. 30, p. 199-218, dez. 2019. Mensal. Centro Científico Conhecer. http://dx.doi.org/10.18677/encibio_2019b22.

SAKTHIVEL, Surya Narayanan; KATHURIA, Ankit; SINGH, Bhupendra. Utilization of inferior quality aggregates in asphalt mixes: a systematic review. *Journal Of Traffic And Transportation Engineering (English Edition)*, [S.L.], v. 9, n. 5, p. 864-879, out. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jtte.2022.03.001>.

SANT'ANA, Walter Canales. Estudo de misturas de areia-asfalto a quente para o estado do Maranhão. 1992. 1 v. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1992.

SELSAL, Zara; KARAKAS, Ahmet Sertac; SAYIN, Baris. Effect of pavement thickness on stress distribution in asphalt pavements under traffic loads. *Case Studies In Construction Materials*, [S.L.], v. 16, p. 01107, jun. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01107>.

SHAMSAEI, Mohsen; CARTER, Alan; VAILLANCOURT, Michel. A review on the heat transfer in asphalt pavements and urban heat island mitigation methods. *Construction And Building Materials*, [S.L.], v. 359, p. 129350, dez. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129350>.

SILVA, Luis Eduardo Cunha; SANTOS, Ana Rocha dos. O Estado e o território de identidade do sisal na Bahia (BA): conflitos da política territorial. *Política e Planejamento Regional*, Rio de Janeiro, v. 6, n. 1, p. 1-24, jan. 2019.

SILVA, Luís Felipe Botelho da; CORREIA, Luiz Soares; SOUSA, Paulo Alves de Aguiar. Análise comparativa entre métodos de dosagem de pavimentos asfálticos. In: Congresso Técnico-Científico da Engenharia e da Agronomia, 7., 2021, [S.L.]. Anais [...] . [S.L]: Contec, 2021. p. 1-5.

SILVA, Odilon Reny R. F. da. Sisal: Cultivares. 2021a. Embrapa Algodão. Disponível em: <https://www.embrapa.br/en/agencia-de-informacao-tecnologica/cultivos/sisal/pre-producao/caracteristicas-das-especies-e-relacoes-com-o-ambiente/cultivares>. Acesso em: 01 mar. 2023.

SILVA, Odilon Reny R. F. da. Sisal: Pós-colheita. 2021b. Embrapa Algodão. Disponível em: <https://www.embrapa.br/en/agencia-de-informacao-tecnologica/cultivos/sisal/producao/pos-colheita>. Acesso em: 02 mar. 2023.

SILVA, Odilon Reny R. F. da. Sisal: qualidade e produção de alimentos seguros. Qualidade e Produção de Alimentos Seguros. 2022. Disponível em: <https://www.embrapa.br/en/agencia-de-informacao-tecnologica/cultivos/sisal/pos-producao/qualidade-e-producao-de-alimentos-seguros>. Acesso em: 02 mar. 2023.

SIMMONS, H. E.; VEST, R. D.; BLOMSTROM, D. C.; ROLAND, J. R.; CAIRNS, T. L. (1962), Thiocyanocarbons. 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.

SINGH, Gurpreet et al. Exploration of sisal fibre for modification of bituminous mix. Materials Today: Proceedings, [S.L.], v. 48, p. 1352-1355, 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.matpr.2021.09.070>.

SIROMA, Rodrigo Shigueiro. Avaliação da deformação permanente em misturas asfálticas densas formuladas com areia descartada de fundição (ADF). 2018. 196 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciências Mecânicas, Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2018.

SISAL RUGS. How is sisal harvested? 2016. Disponível em: <https://www.sisalrugs.com/blog/how-sisal-harvested>. Acesso em: 02 mar. 2023.

SISALSUL (Brasil). Institucional. 2023. Disponível em: <https://sisalsul.com.br/>. Acesso em: 02 mar. 2023.

SOARES, José Hildemarcio Mendes; ARRUDA, Danilo Raimundo de; AMARANTE, Patrícia Araújo. Transformações tecnológicas e econômicas do sisal no Nordeste do Brasil. Research, Society And Development, [S.L.], v. 11, n. 5, p. 1561152784, 1 abr. 2022. Research, Society and Development. <http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v11i5.27847>.

SOUSA, Maria Natália de Melo et al. Estudo de aplicabilidade da adição de fibras de sisal em misturas asfálticas do tipo SMA. In: XXXI Congresso Nacional de Pesquisa em Transporte da ANPET, 31., 2017, Recife. Artigo. Recife: Anpet, 2017. p. 1-12.

SULTANA, Sharmin; BHASIN, Amit. Effect of chemical composition on rheology and mechanical properties of asphalt binder. *Construction And Building Materials*, [S.L.], v. 72, p. 293-300, dez. 2014. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.09.022>.

TEIXEIRA, Luiz Henrique. Avaliação do comportamento funcional de misturas asfálticas drenantes do tipo BBD_r com utilização de matriz betuminosa altamente modificada HiMA. 2021. 176 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciências Mecânicas, Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2021.

TUTU, Kenneth Adomako; NTRAMAH, Simon; TUFFOUR, Yaw Adubofour. Superpave performance graded asphalt binder selection for asphalt mixture design in Ghana. *Scientific African*, [S.L.], v. 17, p. 1348, set. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.sciaf.2022.e01348>.

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, Paula Catalina Hoyos. Cinética de inibição por produto e substrato da hidrólise do bagaço de cana de açúcar. 2017. 159 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, 2017.

VISÃO AGRO. Pesquisadores estudam produção de etanol e biogás a partir do sisal. 2022. Disponível em: <https://visaoagro.com.br/tecnologia/pesquisadores-estudam-producao-de-etanol-e-biogas-a-partir-do-sisal/>. Acesso em: 02 mar. 2023.

WANG, Wengzhong et al. Synthesis and characterization of MSe (M=Zn, Cd) nanorods by a new solvothermal method. *Inorganic Chemistry Communications*, [S.L.], v. 2, n. 3, p. 83-85, mar. 1999. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s1387-7003\(99\)00015-5](http://dx.doi.org/10.1016/s1387-7003(99)00015-5).

WU, Shenghua; MONTALVO, Luke. Repurposing waste plastics into cleaner asphalt pavement materials: a critical literature review. *Journal Of Cleaner Production*, [S.L.], v. 280, p. 124355, jan. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124355>.

XU, Xiong et al. Chemical upcycling of waste PET into sustainable asphalt pavement containing recycled concrete aggre: insight into moisture-induced damage. *Construction And Building Materials*, [S.L.], v. 360, p. 129632, dez. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129632>.

YAO, Ying et al. Micro- and nano-scale mechanisms of enzymatic treatment on the interfacial behaviors of sisal fiber reinforced bio-based epoxy resin. *Industrial Crops And Products*, [S.L.], v. 194, p. 116319, abr. 2023. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.indcrop.2023.116319>.

YU, Xiaokong et al. Rheological, microscopic, and chemical characterization of the rejuvenating effect on asphalt binders. *Fuel*, [S.L.], v. 135, p. 162-171, nov. 2014. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2014.06.038>.

ZHANG, Jia; CAO, Dandan; ZHANG, Jinxi. Three-dimensional modelling and analysis of fracture characteristics of overlaid asphalt pavement with initial crack under temperature and traffic loading. *Construction And Building Materials*, [S.L.], v. 367, p. 130306, fev. 2023. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.130306>.

ZHANG, Jiupeng et al. Evaluating Crack Resistance of Asphalt Mixture Based on Essential Fracture Energy and Fracture Toughness. *International Journal Of Geomechanics*, [S.L.], v. 19, n. 4, p. 1-8, abr. 2019. American Society of Civil Engineers (ASCE). [http://dx.doi.org/10.1061/\(asce\)gm.1943-5622.0001390](http://dx.doi.org/10.1061/(asce)gm.1943-5622.0001390).

ZHANG, Wanjing et al. Insights into the contributions of hemicelluloses to assembly and mechanical properties of cellulose networks. *Carbohydrate Polymers*, [S.L.], v. 301, p. 120292, fev. 2023. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.carbpol.2022.120292>.

ZHANG, Zhongsen et al. Determination of interfacial properties of cellulose nanocrystal-modified sisal fibre in epoxy by cyclic single-fibre pull-out. *Composites Science And Technology*, [S.L.], v. 193, p. 108142, jun. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compscitech.2020.108142>.

ZHOU, Jie et al. Evaluation of low temperature performance for SBS/CR compound modified asphalt binders based on fractional viscoelastic model. *Construction And Building Materials*, [S.L.], v. 214, p. 326-336, jul. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.04.064>.

ZHU, Zhihua; HAO, Mingyang; ZHANG, Ning. Influence of contents of chemical compositions on the mechanical property of sisal fibers and sisal fibers reinforced PLA composites. *Journal Of Natural Fibers*, [S.L.], v. 17, n. 1, p. 101-112, 3 maio 2018. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.1080/15440478.2018.1469452>.