

19 a 22 de Setembro de 2023
Foz do Iguaçu - PR

www.rapvenacor.com.br



25º Encontro Nacional de Conservação Rodoviária (ENACOR) 48ª Reunião Anual de Pavimentação (RAPV)

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

DOI: (a ser preenchido após o envio do código DOI da publicação)

*Felipe de Hollanda Evaldt¹; Breno Salgado Barra¹; Yader Guerrero¹; Alexandre Mikowski¹;
Rafael Cristyan Fronza¹*

RESUMO

O objetivo principal deste trabalho é avaliar o comportamento funcional de misturas asfálticas densas do tipo *Béton Bitumineux Semi-Grenus* (BBSG), com a incorporação de fibra de sisal. A metodologia francesa foi usada como base conceitual. As formulações testadas compreenderam o uso de ligante betuminoso 30/45 convencional, com frações granulares de origem gnáissica e composição granulométrica calculada através do método de Fuller-Talbot, compreendendo o intervalo 0/14 mm. As fibras de sisal foram incorporadas nos teores de 0,3 % e 0,5 % em relação ao volume de mistura asfáltica. A campanha experimental compreendeu os ensaios de avaliação da habilidade de compactação com a Prensa de Cisalhamento Giratório (PCG), análise da resistência à ação da água pelo ensaio de Duriez a 18°C e da deformação permanente a 60 °C. Os resultados obtidos indicam que a incorporação de sisal elevou os percentuais de vazios, demandando necessidade de maior aporte de ligante betuminoso para obtenção de condições adequadas de trabalhabilidade e compacidade. 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, corroborando para o rompimento da película de ligante. A disposição intersticial dos fios de sisal, muitas vezes de forma concentrada e tramada, reduziu o contato direto dos granulares, prejudicando o intertravamento das partículas, fator que associado ao maior aporte de ligante betuminoso, contribuiu para acentuar o fenômeno da fluência e o efeito lubrificante nas interfaces granulares, diminuindo a resistência à deformação permanente das misturas asfálticas.

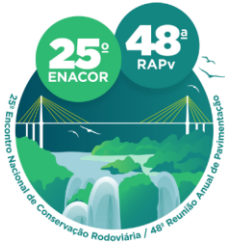
PALAVRAS-CHAVE: comportamento funcional; misturas asfálticas; fibras de sisal.

ABSTRACT

The main objective of this work is to evaluate the functional behavior of dense asphalt mixtures of the *Béton Bitumineux Semi-Grenus* (BBSG) type, with the incorporation of sisal fiber. The french methodology was used as a conceptual basis. The tested formulations comprised the use of a conventional 30/45 bituminous binder, with granular fractions of gneiss origin and granulometric composition calculated using the Fuller-Talbot method, comprising the 0/14 mm interval. Sisal fibers were incorporated at levels of 0.3% and 0.5% in relation to the volume of asphalt mix. The experimental campaign comprised tests to evaluate the compaction ability with the Rotary Shear Press (PCG), analysis of resistance to water action by the Duriez test at 18°C and permanent deformation at 60°C. The results obtained indicate that the incorporation of sisal increased the percentage of voids, requiring a greater supply of bituminous binder to obtain adequate conditions of workability and compactness. The resistance to the deleterious action of water was also impaired, due to the hygroscopic behavior of sisal, which tends to absorb water inside its reticular structure, expanding its volume, corroborating to the rupture of the binder film. The interstitial arrangement of the sisal threads, often in a concentrated and woven form, reduced the direct contact of the granular material, impairing the interlocking of the particles, a factor that, associated with the greater supply of bituminous binder, contributed to accentuate the phenomenon of creep and the lubricating effect in the granular interfaces, reducing the resistance to permanent deformation of the asphalt mixtures.

KEY WORDS: functional behavior; asphalt mixes; sisal fibers.

¹ Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), e-mail: ofelipeevaldt@gmail.com; breno.barra@ufsc.br; yagcivil@gmail.com; alexandre.mikowski@ufsc.br; rafael.c.fronza@gmail.com.



19 a 22 de Setembro de 2023
Foz do Iguaçu - PR

www.rapvenacor.com.br



INTRODUÇÃO

Misturas asfálticas estão diretamente relacionadas à infraestrutura e desenvolvimento econômico, viabilizando a cadeia logística de bens e serviços. Contudo, o processo de formulação destes materiais exige uma busca extensiva pela melhor combinação de diversos parâmetros, 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).

No Brasil, o modal rodoviário é, com grande margem, o mais utilizado em todas as regiões. Contudo, grande parte das rodovias brasileiras apresentam 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 (ROCHA; FERREIRA; BORBA, 2019).

Concomitante a este cenário, fatores como o forte apelo ecológico e sustentável, cada vez mais crescentes e as preocupações com a necessidade de uso racional de derivados do petróleo nas próximas décadas, 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 (DYER; LIMA, 2022; GAUDENZI *et al.*, 2023).

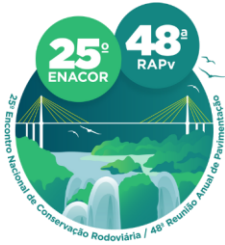
Neste contexto encontram-se algumas pesquisas que descrevem os efeitos da incorporação de fibras de sisal em misturas asfálticas. Trabalhos como os de Ramalingam, Murugasan e Nagabushana (2017), Sousa *et al.* (2017), Kumar e Ravitheja (2019) e Singh *et al.* (2022) analisaram o comportamento mecânico de misturas asfálticas com a incorporação de fibras de sisal em diversos teores e comprimentos de fio, e indicaram que alterações importantes nas principais características analisadas geralmente são obtidas 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.

Desta forma, o presente trabalho propõe a formulação e avaliação do comportamento funcional de uma mistura asfáltica densa, do tipo BBSG, do francês *Béton Bitumineux Semi-Grenus*, com a incorporação de fibras de sisal nos teores de 0,3 % e 0,5 % em relação ao volume de mistura asfáltica, a fim de verificar o efeito e a viabilidade técnica deste insumo nas propriedades físicas e mecânicas das formulações testadas, comparando-as a misturas convencionais de referência, do mesmo tipo, porém sem a incorporação destas fibras.

CONSIDERAÇÕES GERAIS SOBRE FIBRAS DE SISAL

O sisal é uma fibra vegetal obtida através do beneficiamento da planta *Agave Sisalana* ou suas versões híbridas, espécime originário do México, cujo cultivo é atualmente praticado em diversos países de clima tropical, dentre os quais o Brasil se destaca como o maior produtor e exportador mundial, respondendo por mais de 40 % de toda a produção desta fibra no mundo (FAO, 2023).

Similar a diversas outras fibras vegetais duras encontradas na natureza, as fibras de sisal apresentam uma estrutura complexa, composta por microfibrilas dispostas em um sistema multicamadas, formando uma estrutura alongada e reforçada, contendo um canal central no interior da microestrutura, denominado lúmen (MANIAN; CORDIN; PHAM, 2021).



19 a 22 de Setembro de 2023
Foz do Iguaçu - PR

www.rapvenacor.com.br



Conforme evidencia a Figura 1, este sistema estrutural apresenta quatro camadas, a mais externa denominada parede celular primária, e outras três camadas mais internas, S1, S2 e S3, compondo a parede celular secundária, ambas formadas por feixes de microfibrilas que compõem-se de celulose, hemicelulose, lignina e pectina (YAO *et al.*, 2023).

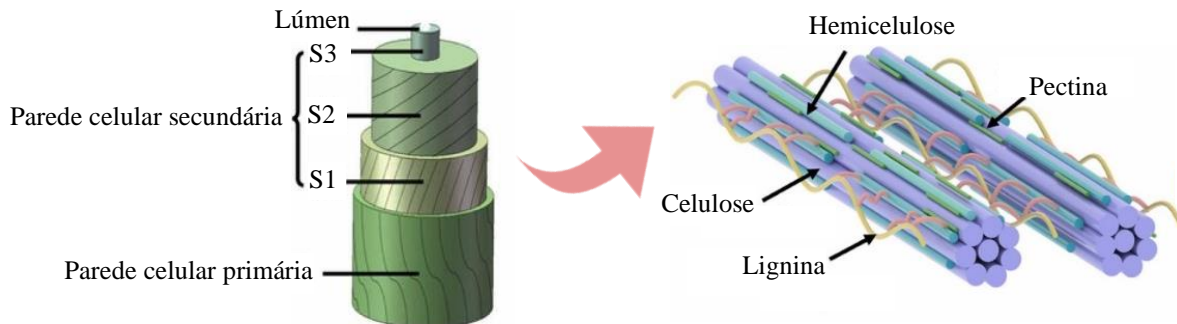


Figura 1. Estrutura multiescala de uma fibra de sisal (YAO *et al.*, 2023).

A celulose, composta de várias unidades de celobiose em formação cristalina, é insolúvel em água, e responsável por grande parte da resistência mecânica da fibra. A hemicelulose apresenta forte ligação aos cristais celulósicos, conferindo flexibilidade a estes, enquanto a lignina e pectina, presentes em menor proporção, associam-se formando uma matriz amorfa que gera um efeito aglutinante e pozolânico, conferindo rigidez e estabilidade à estrutura (ZHANG *et al.*, 2023).

Esta disposição resulta em algumas características físicas de especial interesse à engenharia e, sobretudo, à aplicação pretendida nesta pesquisa, como uma densidade relativamente baixa ($\approx 1,5 \text{ g/cm}^3$), associada a uma boa resistência à tração (511 MPa a 635 MPa) e taxa de alongamento (2,0 % a 2,5 %), valores significativos no contexto de fibras vegetais duras (SINGH *et al.*, 2022).

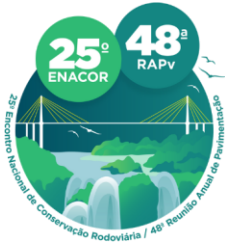
MATERIAIS E MÉTODOS

Materiais

Os granulares pétreos utilizados são oriundos de britagem em jazida com material gnáissico, localizada no município de Joinville/SC. Foram utilizadas frações granulares provenientes de mesma jazida e lote amostral caracterizado por Persike (2023), cujos parâmetros constam na Tabela 1.

Tabela 1. Caracterização do material pétreo (PERSIKE, 2023).

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 %	



19 a 22 de Setembro de 2023
Foz do Iguaçu - PR

www.rapvenacor.com.br



O ligante betuminoso utilizado foi um CAP 30/45 em sua forma pura, oriundo da refinaria REPLAN da Petrobras, localizada em Paulínia/SP, cuja caracterização foi apresentada em laudo técnico fornecido pela refinaria de origem, conforme consta na Tabela 2.

Tabela 2. Caracterização do ligante betuminoso 30/45 (REPLAN, 2018).

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 °C	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 °C	D 70	-	1,01	-
Aquecimento a 177 °C	X 215	Não espuma	Não espuma	-

Os dados de viscosidade pelo método *Saybolt-Furol* (DNER-ME 004, 1994) fornecidos pela refinaria indicaram que a temperatura adequada para usinagem do ligante betuminoso é 155 °C, e a de compactação 145 °C. Desta forma, a temperatura de aquecimento dos granulares foi definida em 168 °C, considerando-se 13 °C acima da temperatura de usinagem.

As fibras de sisal utilizadas foram caracterizadas através de microscopia eletrônica de varredura (MEV) associada a espectroscopia por energia dispersiva (EDS). As microfotografias obtidas por MEV evidenciaram que os fios de sisal apresentam morfologia alongada com textura superficial escamosa, e quando em conjunto, dispõem-se em tramas de aspecto emaranhado, propício à formação de intervalos espaciais que agregam volume ao material, conforme evidencia a Figura 2.

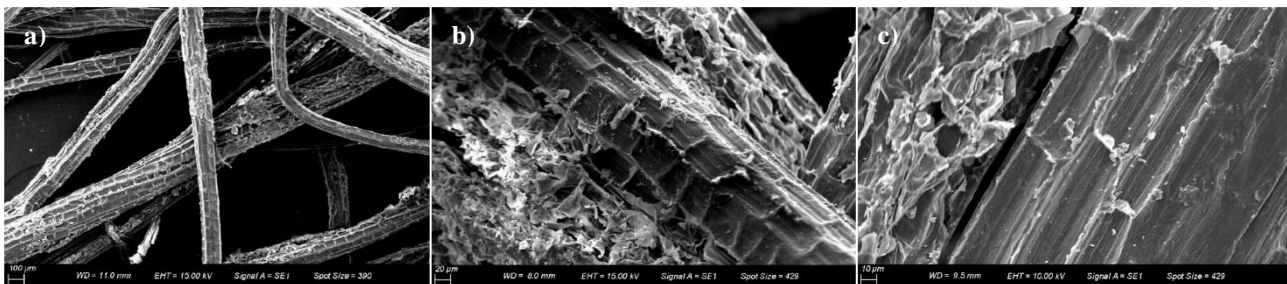


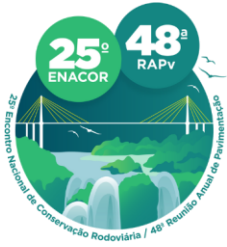
Figura 2. Microfotografias dos fios de sisal com ampliação de: (a) 100x, (b) 500x, (c) 1000x (EVALDT, 2023).

A espectroscopia por energia dispersiva revelou a presença expressiva dos elementos carbono (45,54 %) e oxigênio (37,40 %), que se deve à associação com cálcio, presente em menor proporção (7,12 %) formando carbonato de cálcio (CaCO_3). Em menores proporções verifica-se ainda a presença de potássio (6,60 %), magnésio (1,85 %) e alumínio (1,49 %), substâncias inorgânicas não pertencentes à parede celular, porém vinculadas a reações produtoras de óxidos (ZHU; HAO; ZHANG, 2018).

Métodos

Curva Granulométrica

A formulação da curva granulométrica das misturas asfálticas foi realizada pelo do método racional, utilizando-se as Equações 1 e 2, de Fuller-Talbot, a partir dos pontos de controle estabelecidos pela metodologia francesa para misturas asfálticas do tipo BBSG (MANUEL LPC, 2007).



19 a 22 de Setembro de 2023
Foz do Iguaçu - PR

www.rapvenacor.com.br



$$\%p = a \left(\frac{d}{D} \right)^n \quad (1)$$

$$n = \frac{\log(\%p_{200}) - \log(100)}{\log \left(\frac{d}{D} \right)} \quad (2)$$

Onde

%p: percentagem em peso que passa na peneira de abertura d;

a: constante, tomada igual a 100;

d: abertura da peneira, em mm;

D: tamanho máximo, abertura da peneira que passa 100%, em mm;

n: expoente de graduação da curva granulométrica, obtido pela Equação (2);

%p200: percentagem de material passante na peneira de nº 200.

Desta forma, definindo-se o diâmetro máximo (D) em 12,7 mm e %p200 em 7,0%, obteve-se o expoente “n” igual a 0,52, sendo possível calcular a composição granulométrica com base na série de peneiras selecionadas (Figura 3).

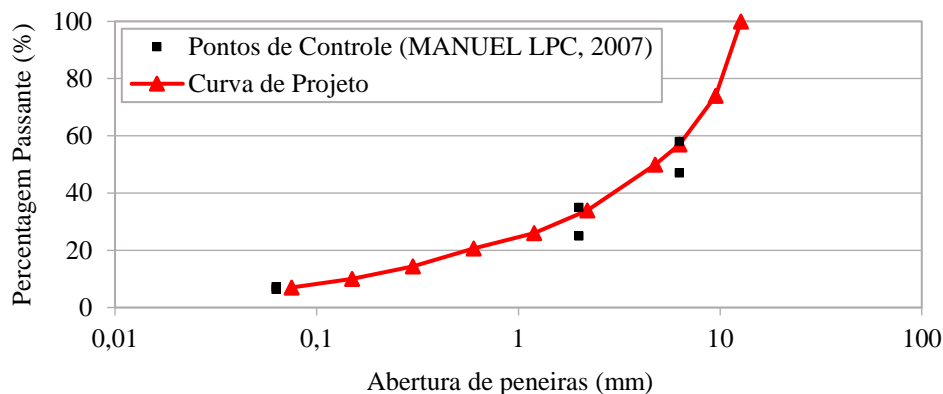
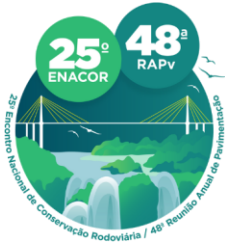


Figura 3. Curva granulométrica do tipo BBSG calculada através do método teórico (EVALDT, 2023).

Conforme evidencia a Figura 3, a curva granulométrica calculada apresenta bom enquadramento aos pontos de controle do Manual LPC para formulações do tipo BBSG, classificando-se também como uma curva de distribuição contínua e graduação densa conforme critérios do DNIT (2006), haja vista o expoente “n” encontrar-se no intervalo $0,35 < n < 0,55$.

Ensaio laboratoriais

Os ensaios laboratoriais realizados na campanha experimental aplicaram os níveis avaliativos sequenciais e eliminatórios 1 e 2 da metodologia francesa (MANUEL LPC, 2007), compreendendo a avaliação dos parâmetros de: (nível 1) (a) habilidade de compactação com a Prensa de Cisalhamento Giratório (PCG) (AFNOR NF EN 12697-31, 2019) relacionando o percentual de vazios (%V) a uma sequência de revoluções axiais aplicados no corpo de prova, e (b) resistência à ação deletéria da água no ensaio de Duriez a 18 °C (AFNOR NF EN 12697-12, 2018) comparando a perda de resistência na ruptura por compressão simples dos corpos de prova condicionados a seco (R) e condicionados em imersão na água por 7 dias consecutivos (r) à referida temperatura, e (nível 2) deformação permanente



19 a 22 de Setembro de 2023
Foz do Iguaçu - PR

www.rapvenacor.com.br



a 60 °C (AFNOR NF EN 12697-22, 2020) avaliada através do afundamento gerado na trilha de roda em um conjunto de placas compactadas em mesa pneumática. Para cada teor de ligante foram produzidas as quantidades de 3, 12 e 2 corpos de prova, respectivamente.

A Tabela 3 apresenta os parâmetros, limites normativos e classificações definidas pela metodologia francesa para misturas asfálticas do tipo BBSG, e a Figura 4 ilustra a sequência dos procedimentos laboratoriais supramencionados.

Tabela 3. Parâmetros e limites normativos considerados nos ensaios (EVALDT, 2023).

Ensaio	Norma	Classe da Mistura BBSG	Limites Normativos
PCG	AFNOR NF EN 12697-31 (2019)	1, 2 e 3	$\% V_{\min} \geq 4,0 \%$ e $\% V_{\max} \leq 9,0 \%$ a 80 giros
Duriez	AFNOR NF EN 12697-12 (2018)	1, 2 e 3	$r/R \geq 0,70$
Deformação Permanente a 60 °C	AFNOR NF EN 12697-22 (2020)	1	$7,5 \% < \% \leq 10,0 \%$, após 30.000 ciclos
		2	$5,0 \% < \% \leq 7,50 \%$, após 30.000 ciclos
		3	$\% \leq 5,0 \%$, após 30.000 ciclos



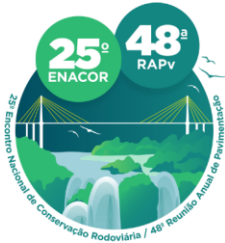
Figura 4. Sequência de ensaios realizados na pesquisa: (a.1, a.2, a.3 e a.4) PCG, (b.1, b.2, b.3 e b.4) Duriez a 18 °C, e (c.1, c.2, c.3 e c.4) deformação permanente a 60 °C (EVALDT, 2023).

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados dos ensaios laboratoriais doravante apresentados foram integralmente comparados aos obtidos por Persike (2023), que realizou a mesma matriz de ensaios indicada anteriormente em uma mistura asfáltica de mesma formulação, porém elaborada apenas com frações britadas, aqui denominada mistura de referência, viabilizando, desta forma, a comparação dos parâmetros obtidos nas formulações testadas com sisal, em relação a uma mistura asfáltica convencional.

Habilidade de compactação na PCG

Os resultados obtidos na avaliação da habilidade de compactação com a PCG indicaram que todas as formulações com fibras de sisal testadas se enquadraram aos critérios normativos da metodologia francesa para BBSG 0/14 mm, conforme a norma AFNOR NF EN 12697-31 (2019), com percentual de vazios respeitando o intervalo de aceitabilidade de 4,0 % a 9,0 % para 80 giros. As curvas de



19 a 22 de Setembro de 2023
Foz do Iguaçu - PR

www.rapvenacor.com.br



compactação para as formulações testadas são apresentadas na Figura 5.

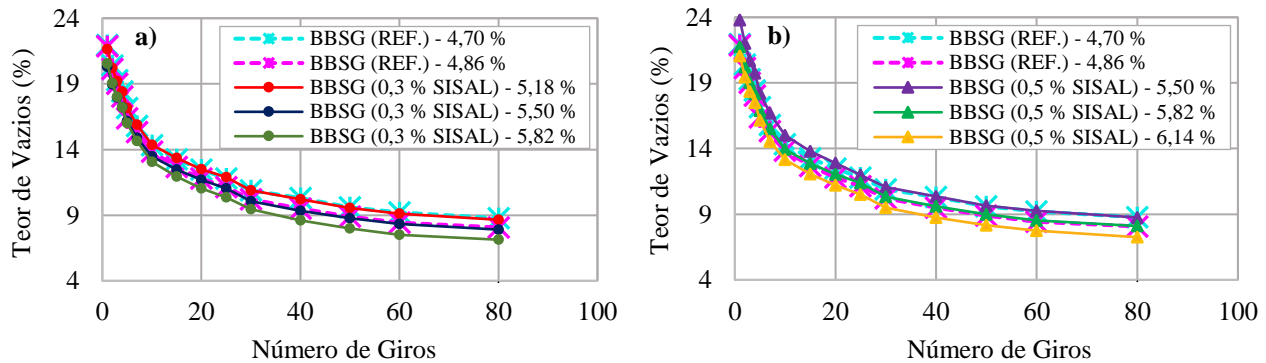


Figura 5. Habilidade de compactação das formulações testadas: (a) de referência e com 0,3% de sisal, e (b) de referência e com 0,5% de sisal.

Contudo, em comparação às misturas de referência, percebe-se que o percentual de vazios eleva-se proporcionalmente ao acréscimo de sisal, indicando que a adição desta fibra reduz progressivamente a estabilidade e trabalhabilidade da mistura asfáltica, demandando a necessidade de maior aporte de ligante betuminoso para a obtenção das mesmas condições de compactação verificadas nas formulações de referência.

Corroborando-se isso que dos resultados obtidos, percebe-se também que as mesmas condições de trabalhabilidade verificadas nas formulações de referência são obtidas com 2 teores a mais de ligante betuminoso para as formulações com 0,3 % de sisal, e 3 teores de ligante a mais para aquelas com 0,5 % da referida fibra, para a situação estudada nesta pesquisa.

Resistência à ação deletéria da água

A avaliação da resistência à ação deletéria da água através do ensaio de Duriez a 18 °C indicou que todas as formulações testadas atenderam à relação mínima $r/R \geq 0,70$, conforme preconizado pela norma AFNOR NF EN 12697-12 (2018) para misturas asfálticas do tipo BBSG. A Figura 6 apresenta a relação r/R com seus respectivos desvios-padrão para as formulações testadas.

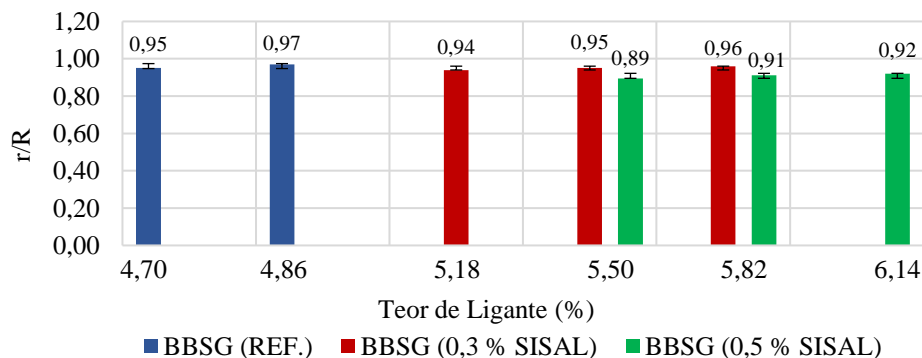
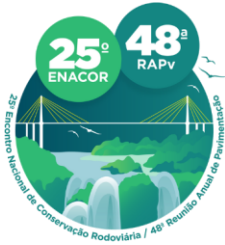


Figura 6. Relação r/R obtida no ensaio de Duriez a 18 °C para as formulações de referência e com sisal (EVALDT, 2023).

Apesar de todas as formulações testadas terem apresentado boa margem em relação aos limites normativos mínimos, percebe-se que aquelas com incorporação de sisal apresentam relação r/R



19 a 22 de Setembro de 2023
Foz do Iguaçu - PR

www.rapvenacor.com.br



inferior às de referência, situação que acentua-se progressivamente, indicando que conforme ocorre o aumento da dosagem de sisal, a resistência à ação deletéria da água reduz.

Dos principais aspectos que corroboram para essa situação, cabe destacar a presença expressiva de carbono (C) na composição das fibras de sisal, material de natureza eletronegativa, tal qual o ligante betuminoso e as frações granulares de origem gnáissica, situação que não contribui para a formação de um dipolo elétrico efetivo entre todos os elementos da mistura asfáltica, tornando-a mais suscetível à ação da água, sobretudo no âmbito da adesividade passiva.

Ainda, a textura escamosa dos fios de sisal não proporciona uma superfície adequada para a fixação da película de ligante, o que facilita o contato dos fios de sisal com a água, situação que pode conduzir a um acúmulo de água no interior do lúmen da fibra, ocasionando a expansão volumétrica desta, corroborando para o rompimento da película de ligante betuminoso, e, portanto, majorando a suscetibilidade à ação da água para as formulações com sisal.

Resistência à deformação permanente

Dos resultados obtidos, verifica-se que todas as formulações com fibra de sisal incorporada 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, com exceção às 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 norma AFNOR NF EN 12697-22 (2020) para este tipo de mistura asfáltica.

No mesmo contexto, verifica-se que a formulação 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, com afundamento na trilha de roda abaixo de 5,0 %, enquanto a dosagem de 4,86 % atingiu a classe intermediária (Classe 2) haja vista o percentual do afundamento obtido (6,66 %) estar situado entre 5,01 % e 7,50%.

A Figura 7 apresenta a evolução das curvas de afundamento na trilha de roda obtidas no ensaio de deformação permanente a 60°C.

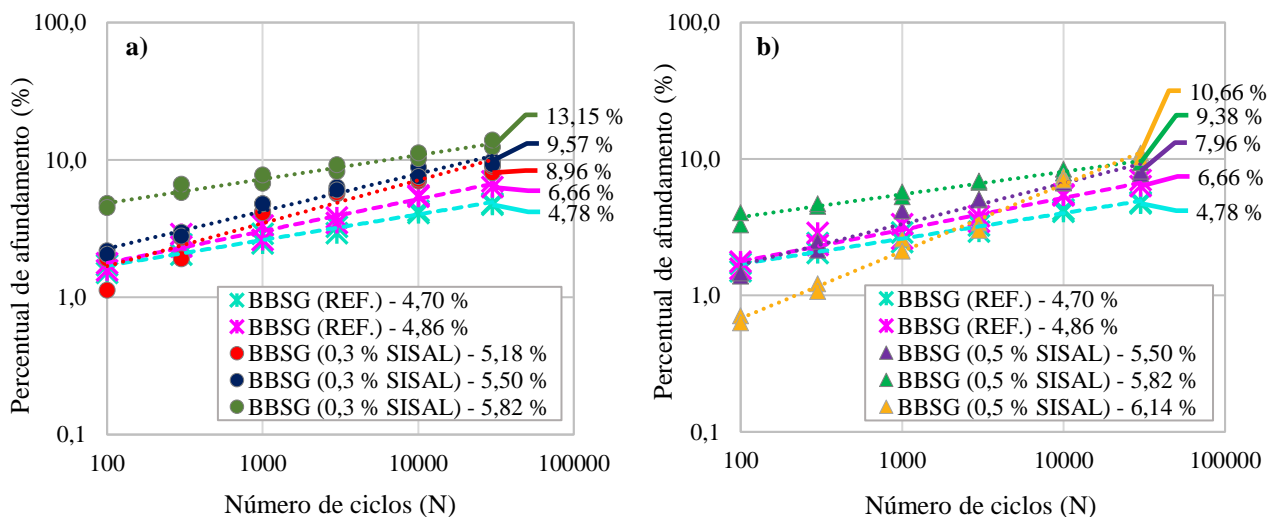
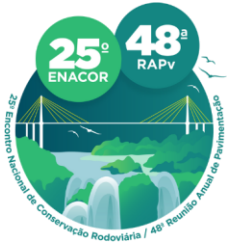


Figura 7. Evolução do afundamento na trilha de roda das misturas asfálticas: (a) de referência e com 0,3 % de sisal, e (b) de referência e com 0,5 % de sisal (EVALDT, 2023).



19 a 22 de Setembro de 2023
Foz do Iguaçu - PR

www.rapvenacor.com.br



Da Figura 7, infere-se também que as formulações com fibra de sisal apresentam menor resistência à deformação permanente do que as formulações de referência, que foram produzidas apenas com frações britadas.

Dos aspectos que para isso corroboram, verificou-se que o sisal incorporado nas formulações distribui-se de forma esparsa ou tramada nos interstícios estruturais da mistura asfáltica, dificultando ou impedindo o contato grão a grão, e, por consequência, diminuindo o intertravamento granular e a resistência da mistura asfáltica ao cisalhamento.

Estas mesmas formações tramadas de sisal dispostas intersticialmente retêm parte do ligante betuminoso livre necessário à estabilização da mistura asfáltica, demandando a necessidade de maior aporte de ligante betuminoso para que a mistura apresente condições adequadas de trabalhabilidade e estabilidade, conforme já evidenciado através dos resultados obtidos na PCG.

Contudo, o maior aporte de ligante betuminoso aumenta a suscetibilidade térmica da mistura, aumentando o efeito lubrificante entre as partículas, e consequentemente reduzindo a resistência à deformação permanente.

A Figura 8 apresenta de maneira esquemática os aspectos supramencionados, demonstrando a distinção entre os interstícios estruturais de uma formulação com incorporação de fibras de sisal e uma formulação convencional, como a mistura de referência aqui citada.

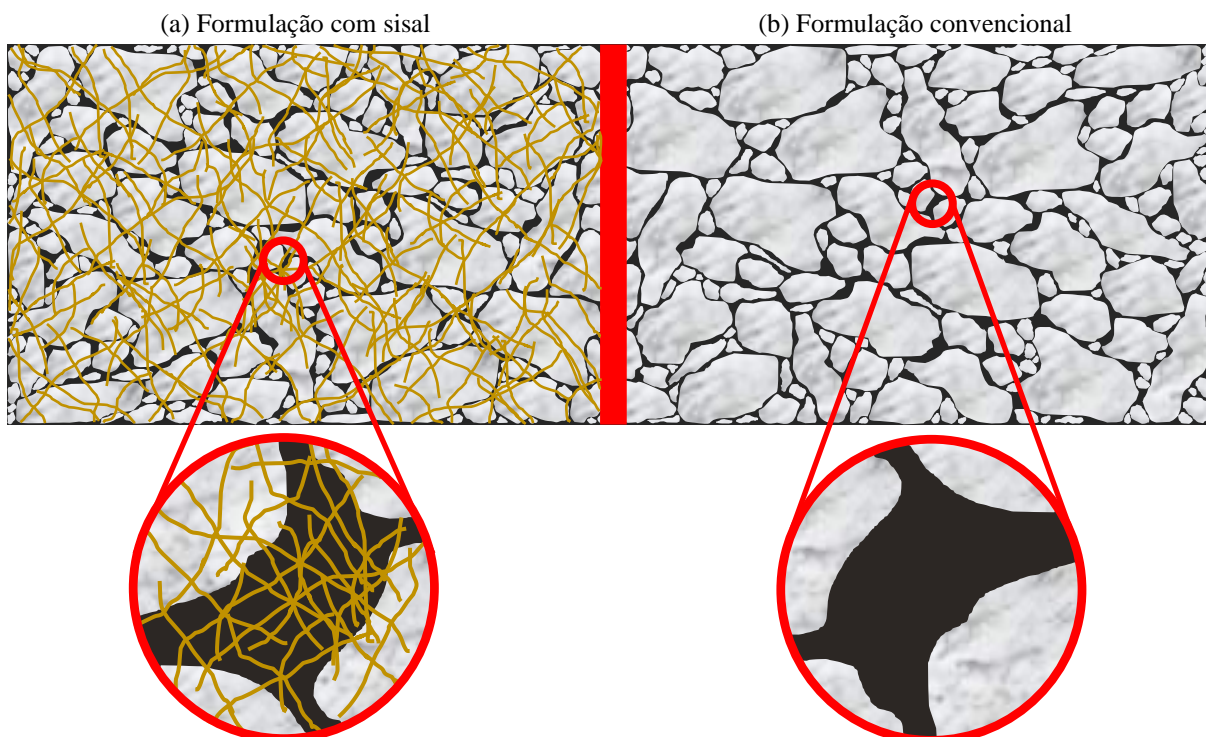
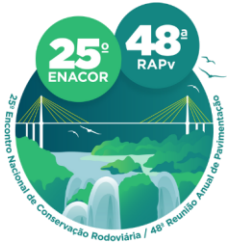


Figura 8. Representação esquemática dos interstícios estruturais (a) de uma mistura asfáltica com fibra de sisal e (b) de uma mistura asfáltica convencional (EVALDT, 2023).

Da Figura 8 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 9, que apresenta o registro fotográfico



19 a 22 de Setembro de 2023
Foz do Iguaçu - PR

www.rapvenacor.com.br



ampliado do arranjo granular observado nas seções transversais das formulações convencionais e das formulações com sisal

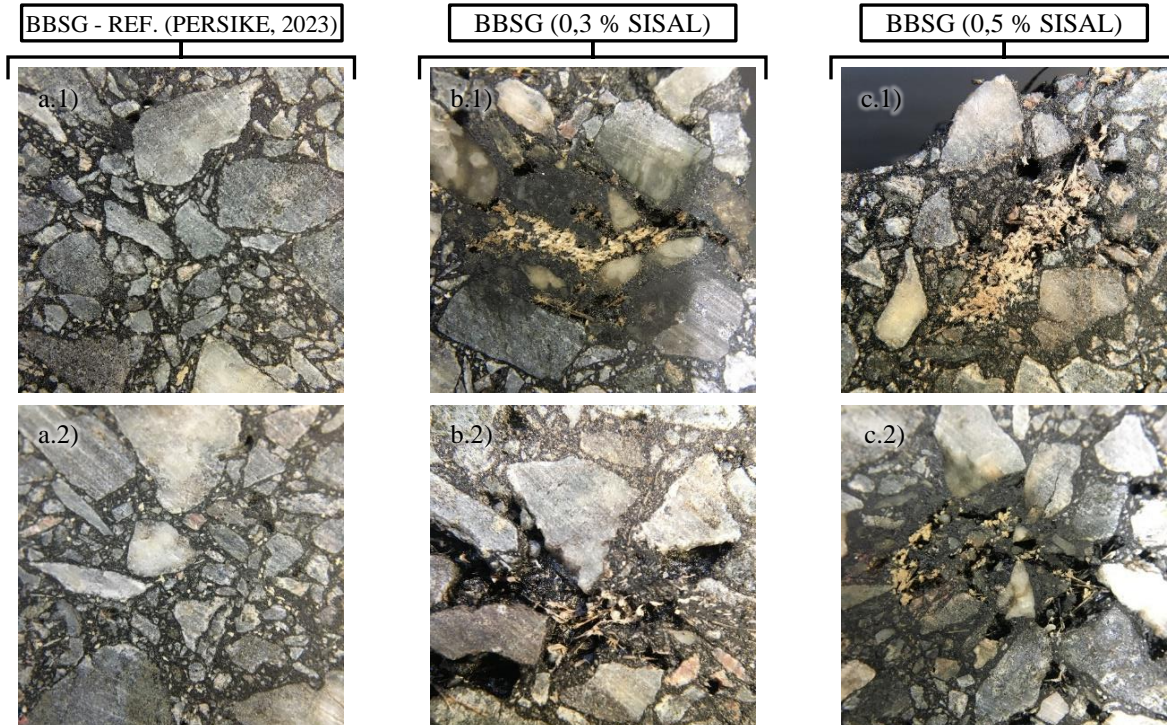


Figura 9. Arranjo granulométrico verificado através da seção transversal das misturas asfálticas (a.1 e a.2) de referência, (b.1 e b.2) com 0,3% de sisal e (c.1 e c.2) com 0,5% de sisal (EVALDT, 2023).

Verifica-se, na Figura 9, diversos dos fenômenos descritos anteriormente, sobretudo, maior concentração de vazios e redução do contato grão a grão devido à disposição das tramas de sisal nos interstícios estruturais da mistura, bem como retenção de ligante betuminoso nos emaranhados volumétricos de fios da referida fibra.

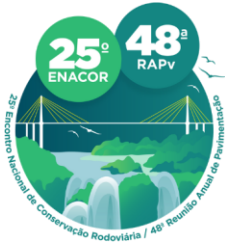
CONCLUSÕES

As misturas asfálticas BBSG com fibras de sisal testadas nesta pesquisa se mostraram menos vantajosas do que as misturas asfálticas convencionais de referência nos níveis de avaliação da metodologia francesa, que correspondem aos parâmetros do comportamento funcional destas.

A tendência natural das fibras de sisal se aglomerarem em formações tramadas 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 condições adequadas de compactidade 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.

O somatório de todas essas características também resultou numa condição de menor resistência ao



19 a 22 de Setembro de 2023
Foz do Iguaçu - PR

www.rapvenacor.com.br



fenômeno de deformação permanente para as formulações com sisal, em comparação às misturas de referência. A presença desta fibra entre os granulares, sobretudo as formações 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 conseqüentemente 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, em continuidade a esta pesquisa, a realização de pesquisas complementares em misturas asfálticas com outras composições granulométricas, de forma a perscrutar possíveis situações em que a incorporação de fibra de sisal se mostre vantajosa, tanto no aspecto mecanicista, quanto nos aspectos econômico e funcional.

REFERÊNCIAS

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.

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.

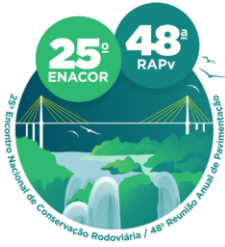
CAO, Liping; SU, Zhibin; LIU, Ruirui; ZHOU, Tao (2022), Optimized formulation of asphalt compound containing bio-oil and shredded rubber. Journal Of Cleaner Production, [S.L.], v. 378, p. 134591.

DNER-ME 004 (1994), Material betuminoso: determinação da viscosidade Saybolt-Furol a alta temperatura. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes.

DNIT (2006), Manual de pavimentação. 3ª Edição, Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, Instituto de Pesquisa Rodoviária (IPR) – Publicação IPR-719, 274 p.

DYER, Paulo P.O.L.; LIMA, Maryangela Geimba de (2022), Waste foundry sand in hot mix asphalt: a review. Construction And Building Materials, [S.L.], v. 359, p. 129342.

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



19 a 22 de Setembro de 2023
Foz do Iguaçu - PR

www.rapvenacor.com.br



- FAO (2023), Food and Agriculture Organization of the United Nations. Sisal. Disponível em: <https://www.fao.org/economic/futurefibres/fibres/sisal/en/>. Acesso em: 15 mai. 2023.
- GAUDENZI, Elena; CARDONE, Fabrizio; LU, Xiaohu; CANESTRARI, Francesco (2023). The use of lignin for sustainable asphalt pavements: a literature review. *Construction And Building Materials*, [S.L.], v. 362, p. 129773.
- KUMAR, N.L.N. Kiran; RAVITHEJA, A (2019), Characteristics of stone matrix asphalt by using natural fibers as additives. *Materials Today: Proceedings*, [S.L.], v. 19, n. 1, p. 397-402.
- MANIAN, Avinash P.; CORDIN, Michael; PHAM, Tung (2021), Extraction of cellulose fibers from flax and hemp: a review. *Cellulose*, v. 28, n. 13, p. 8275-8294.
- MANUEL LPC (2007), Manuel LPC d'aide à la formulation des enrobés. Groupe de Travail RST "Formulation des enrobés". Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, 199 p. Paris, France.
- MINISTÉRIO DA INFRAESTRUTURA (Brasil) (2022), 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.
- PERSIKE, T. (2023), Avaliação da Resistência à Deformação Permanente de Misturas Asfálticas Densas com Incorporação de Resíduos de Construção e Demolição. Joinville: Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciências Mecânicas da Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC.
- RAMALINGAM, S.; MURUGASAN, R.; NAGABHUSHANA, M.N. (2017), Laboratory performance evaluation of environmentally sustainable sisal fibre reinforced bituminous mixes. *Construction And Building Materials*, [S.L.], v. 148, p. 22-29.
- REPLAN (PETROBRAS) (2018), 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 (2019), Diagnóstico de patologias encontradas em pavimentos rodoviários flexíveis e semirrígidos. *Enciclopédia Biosfera*, [S.L.], v. 16, n. 30, p. 199-218.
- SINGH, Gurpreet; SINGH, Sandeep; KUMAR, Raman; CHOCHAN, Jasgurpreet Singh (2023), Exploration of sisal fibre for modification of bituminous mix. *Materials Today: Proceedings*, v. 48, p. 1352-1355.
- SOUSA, Maria Natália de Melo; LUCENA, Lêda Christiane de Figueiredo Lopes; COSTA, Laiana Ferreira da Costa; SILVA, Yana de Medeiros (2017), 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.
- YAO, Ying; DOU, Hao; LIU, Tao; WANG, Shujuan; GAO, Yuan; KANG, Jingyu; GAO, Xingzhong; XIA, Changlei; LU, Yao; FAN, Wei (2023), Micro- and nano-scale mechanisms of enzymatic treatment on the interfacial behaviors of sisal fiber reinforced bio-based epoxy resin. *Industrial Crops And Products*, v. 194, p. 116319.
- ZHANG, Wanjing; YANG, Jiyu; LU, Yan; LI, Mingfei; PENG, Feng; BIAN, Jing (2023), Insights into the contributions of hemicelluloses to assembly and mechanical properties of cellulose networks. *Carbohydrate Polymers*, v. 301, p. 120292.
- ZHU, Zhihua; HAO, Mingyang; ZHANG, Ning (2018), Influence of contents of chemical compositions on the mechanical property of sisal fibers and sisal fibers reinforced PLA composites. *Journal Of Natural Fibers*, v. 17, n. 1, p. 101-112.