

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

[www.rapvenacor.com.br](http://www.rapvenacor.com.br)



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

### AVALIAÇÃO COMPARATIVA DOS PARÂMETROS DE DOSAGEM DE MISTURAS ASFÁLTICAS COM A INCORPORAÇÃO DE FIBRA DE SISAL

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

*Beatriz Paula Fieldkircher<sup>1</sup>; Breno Salgado Barra<sup>1</sup>; Yader Guerrero<sup>1</sup> & Rafael Cristyan Fronza<sup>1</sup>*

#### RESUMO

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

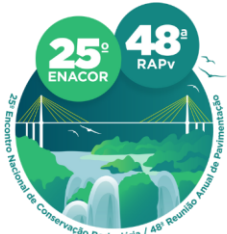
**PALAVRAS-CHAVE:** misturas asfálticas densas; BBSG; fibra de sisal; parâmetros de dosagem.

#### ABSTRACT

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

**KEY WORDS:** dense asphalt mixes; BBSG; sisal fiber; dosage parameters.

<sup>1</sup> Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC/Joinville); e-mail: [beatrizfieldkircher@gmail.com](mailto:beatrizfieldkircher@gmail.com); [breno.barra@ufsc.br](mailto:breno.barra@ufsc.br); [yagcivil@gmail.com](mailto:yagcivil@gmail.com); [rafael.c.fronza@gmail.com](mailto:rafael.c.fronza@gmail.com)



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

[www.rapvenacor.com.br](http://www.rapvenacor.com.br)



## INTRODUÇÃO

No contexto brasileiro, o setor de transporte merece atenção devido a sua importância econômica e social. Dados do Plano Nacional de Logística 2035 (PNL, 2020), apontam, que o modal rodoviário comporta entre 64 % e 85 % das matrizes de transporte de cargas e cargas gerais, respectivamente, além de compreender 93 % da matriz de transporte de pessoas. Portanto, a necessidade do uso massivo desta modalidade enseja também a existência de estruturas de pavimento adequadas, que garantam a resistência aos esforços aplicados pelo tráfego e às ações intempéricas durante o período de projeto estimado.

Entretanto, são inúmeros os problemas relacionados à infraestrutura rodoviária no Brasil, sobretudo no que diz respeito à qualidade dos pavimentos. De acordo com o levantamento realizado pela Confederação Nacional das Indústrias (CNI, 2022), a demanda por investimento nos 50 mil km de rodovias sob administração do DNIT, foi estimada em R\$ 12,2 bilhões.

Existem diversos fatores que influenciam na baixa qualidade dos pavimentos brasileiros e em sua rápida degradação, dentre os quais podem-se destacar a falta de fiscalização do excesso de carga por eixo nos caminhões transportadores, técnicas de execução em campo inadequadas, ausência de auscultação do pavimento de forma periódica e prévia à degradação consumada, uso de métodos de ensaios sem estreita relação campo/laboratório, composições granulométricas baseadas em processos por tentativa e com frações comerciais heterogêneas, além de metodologias de formulação de misturas asfálticas e de dimensionamento de estruturas de pavimento tecnicamente obsoletas (BARRA, 2009).

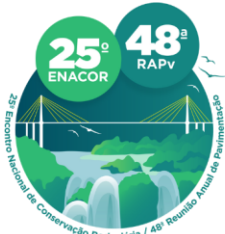
Verifica-se uma crescente busca por materiais mais resistentes e sustentáveis que possam ser incorporados às misturas asfálticas. Neste contexto, dentre as fibras utilizadas na engenharia, as de origem vegetal têm se constituído em uma alternativa às fibras sintéticas na produção de materiais compósitos, sobretudo em países de clima tropical, devido à abundância, menor custo, baixa densidade, biodegradabilidade, flexibilidade durante o processamento, menor desgaste, e pouco risco à saúde durante o manuseio (MASHAAN *et al.*, 2021; SOUSA *et al.*, 2017; ABTAHI *et al.*, 2010; MARTIN *et al.*, 2009).

Com o intuito de promover o conceito de sustentabilidade por meio da utilização de fibras vegetais provenientes de fontes renováveis, este trabalho teve como objetivo avaliar os impactos da incorporação de fibra de sisal em formulações de misturas asfálticas densas do tipo *Béton Bitumineux Semi Grenus* (BBSG), com enfoque nas propriedades físicas, parâmetros de dosagem e resistência à ação da água.

## MATERIAIS E MÉTODOS

### Materiais

As frações pétreas utilizadas neste trabalho provêm da britagem de maciço rochoso gnáissico, a partir de jazida localizada na cidade de Joinville/SC. A Tabela 1 apresenta os resultados da caracterização destes materiais, com base na pesquisa de Fronza (2022), que utilizou partículas granulares de mesma origem.



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

www.rapvenacor.com.br



Tabela 1. Caracterização do material pétreo (FRONZA, 2022).

Ensaio	Norma	Resultado	Limite
Desgaste por abrasão Los Angeles	DNER-ME 035/98	13,4 %	≤ 50 %
Índice de Forma	ABNT NBR 7809/2006	0,65	≥ 0,5
Resistência ao ataque químico (Durabilidade)	DNER-ME 089/94	3,1 %	≤ 12 %
Adesividade ao agregado graúdo	DNER-ME 78/94	Má	-
Equivalência de areia	DNER-ME 54/97	78 %	-
Teor de material pulverulento	DNER-ME 266/97	0,1 %	≤ 1,0 %
Absorção	DNER-ME 81/98 e DNER-ME 84/95	0,3 %	-
Massa específica aparente	DNER-ME 195/97	2,768 g/cm <sup>3</sup>	-
Massa específica real	DNER-ME 195/97	2,812 g/cm <sup>3</sup>	-

De acordo com Pereira (2009) e Pan *et al.* (2006), a quantidade de energia necessária para quebrar a união entre o ligante betuminoso e a partícula granular está relacionada à adesividade do conjunto. Como descrito na Tabela 1, a má adesividade observada pode ser atribuída à composição química do granular. Bernucci *et al.* (2022) indicam que granulares de origem gnáissica possuem elevada percentagem de sílica (SiO<sub>2</sub>), o que resulta em uma carga fortemente eletronegativa na presença de água. Como consequência, esses materiais apresentam comportamento hidrófilo e baixa adsorção química de líquidos quando em contato com a superfície do granular. Para a solução do problema são utilizados fileres ativos ou aditivos melhoradores de adesividade.

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

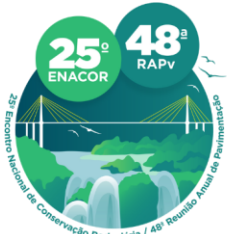
O cimento asfáltico de petróleo (CAP) utilizado foi fornecido por refinaria localizada em Paulínia/SP, com uma faixa de penetração em 30/45, em que suas características são apresentadas na Tabela 2.

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

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

As análises laboratoriais da fibra de sisal foram realizadas no Laboratório de Caracterização Microestrutural (LACAMI) do Centro Tecnológico SATC, em Criciúma/SC. Os ensaios de caracterização compreenderam microscopia eletrônica de varredura (MEV), espectrometria por fluorescência de Raios-X (FRX), difratometria de Raios-X (DRX), termogravimetria (TGA) e calorimetria diferencial (DSC), e espectroscopia infravermelha por transformada de Fourier (FTIR). As amostras enviadas ao LACAMI foram tratadas por Evaldt (2023), em que maiores detalhes serão abordados no tópico sobre os procedimentos laboratoriais.

Pela análise de MEV, observa-se que as fibras de sisal são formadas por fios longos com microfibrilas orientadas longitudinalmente, que se juntam em uma trama emaranhada, criando intervalos espaciais e volume ao material (Figura 1). A parede celular, escamosa e irregular, é composta de celulose,



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

www.rapvenacor.com.br



hemicelulose e lignina, que de acordo com estudos realizados por Martin et al. (2009), Mwaikambo e Ansell (2002) e Medina (1954), tornam as fibras impermeáveis e rígidas.

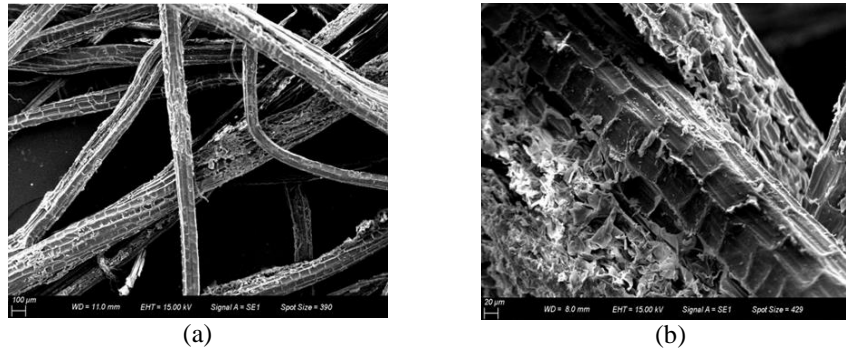


Figura 1. Fibra de sisal: (a) visão geral dos fios (aumento de 390 vezes), (b) textura escamosa da parede celular (aumento de 429 vezes).

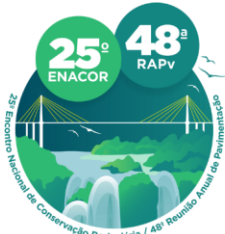
Foi constatada, por meio da análise de composição química utilizando a técnica de energia dispersiva (EDS) durante a microscopia eletrônica de varredura, a presença dos elementos Carbono (C; 45,54 %) e Oxigênio (O; 37,40 %) na parede celular das fibras de sisal. Essa presença pode ser explicada pela associação com o Cálcio (Ca) na formação do composto Carbonato ( $\text{CaCO}_3$ ).

A composição química das fibras de sisal foi determinada no ensaio de FRX, utilizando energia dispersiva. A análise revelou que o Óxido de Cálcio ( $\text{CaO}$ ; 49,57%) é o componente predominante, derivado do Carbonato de Cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ), presente naturalmente na parede celular das fibras. Observou-se também a existência de Dióxido de Titânio ( $\text{TiO}_2$ ; 32,79 %), que é resultado de uma aplicação comum na indústria como proteção à radiação ultravioleta (RADETIC, 2013). A presença de elementos pesados está dentro dos limites impostos pela norma ABNT NBR 10004 (2004), o que classifica a fibra de sisal como Resíduo Não Perigoso, Classe II B, Inertes.

Com base na análise de Difração de Raios-X (DRX), encontram-se presentes na composição da fibra de sisal investigada, elementos como Dióxido de Titânio ( $\text{TiO}_2$ ) para estabilização térmica dos fios, e Uréia ( $\text{H}_4\text{N}_2\text{O}$ ), geralmente adicionada para fins de reação exotérmica. No que diz respeito à indústria agrícola, uma das alternativas para melhorar o valor nutritivo do resíduo do sisal utilizado em fertilizantes é o tratamento químico com Uréia. A fase de Zincocromita ( $\text{Cr}_2\text{O}_4\text{Zn}$ ) é resultado da associação dos metais Zinco (Zn) e Cromo (Cr) presentes em menor escala na composição química das fibras de sisal estudadas. Conclui-se que as fibras de sisal utilizadas neste estudo não se encontram em seu estado natural, uma vez que já foram submetidas a processos químicos industriais com o objetivo de torná-las mais resistentes e multifuncionais.

A análise da fibra de sisal por Termogravimetria (TGA) e calorimetria diferencial (DSC) indicaram que a degradação estrutural do ligante betuminoso e das fibras de sisal ocorre após 460 °C. O Dióxido de Titânio ( $\text{TiO}_2$ ), presente em quantidade expressiva na composição química das amostras, é responsável pela boa resistência das fibras de sisal ao processo termogravimétrico.

Os resultados do ensaio de Espectroscopia Infravermelha por Transformada de Fourier (FTIR), indicaram a presença de diferentes grupos químicos, como as pontes de Hidrogênio (H), especialmente com o Oxigênio (O-H) e Nitrogênio (N-H), grupos carbonílicos (C=O) e ligações C-H. Também foram observados os grupos C-O e C-N, e grupos sulfóxidos provenientes da união dos percentuais de Enxofre (S) existentes na composição do ligante betuminoso e da fibra de sisal. Além disso, foram identificadas ligações dos átomos de Carbono, Nitrogênio, Oxigênio e Enxofre com metais presentes em pequenas concentrações na composição amostral.



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

www.rapvenacor.com.br



## Métodos

### Definição da curva granulométrica

As curvas granulométricas foram calculadas utilizando o método racional, com o uso das Equações 1 e 2 de Fuller-Talbot.

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

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

onde:

%p: porcentagem passante das frações granulares a um dado diâmetro 'd' de peneira;

a: constante, tomada igual a 100;

d: abertura da peneira, em mm;

D: diâmetro máximo, correspondente à abertura de peneira em que passa 100% das frações, em mm;

n: expoente indicador de graduação da curva granulométrica;

%p<sub>200</sub>: percentual passante na peneira de menor abertura da série, neste caso, nº 200 ou 0,075 mm;

O método racional adotado neste estudo, compreende a seleção discretizada dos diâmetros de partículas. Desta forma, permite um controle preciso da distribuição proporcional dos percentuais granulares individuais, sem a necessidade de utilizar faixas granulométricas, como é o caso da formulação por tentativa adotada pelos órgãos rodoviários no Brasil (ANDRADE *et al.*, 2020).

A composição granulométrica utilizada foi a mesma estudada por Evaldt (2023), que realizou pesquisa relacionada ao desempenho funcional do mesmo tipo de mistura asfáltica (BBSG), à luz da metodologia francesa. A Figura 2 ilustra a curva granulométrica adotada com os respectivos pontos de controle indicados em Manuel LPC (2007).

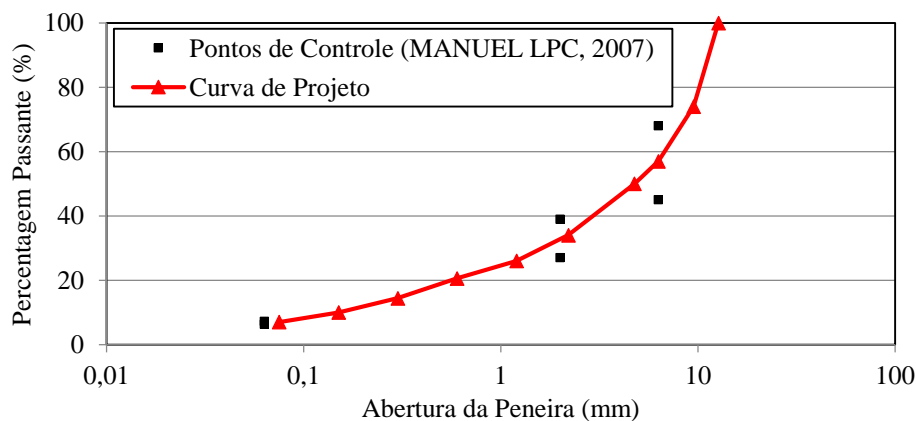
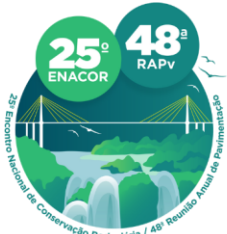


Figura 2. Curva granulométrica de projeto BBSG (EVALDT, 2023).

A curva granulométrica é do tipo *Béton Bitumineux Semi-Grenus* (BBSG), com diâmetro máximo de 12,7 mm e %p<sub>200</sub> de 7,0 %. A partir da Equação 2, o expoente 'n' foi determinado em 0,52, constituindo uma curva de graduação densa pelos critérios do DNIT (2006), devido encontrar-se no intervalo  $0,35 < n < 0,55$ .



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

[www.rapvenacor.com.br](http://www.rapvenacor.com.br)



## Procedimentos Laboratoriais

O estudo da dosagem das misturas asfálticas ocorreu a partir da metodologia Marshall (DNER-ME 043, 1995), oficialmente adotada no Brasil pelo Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT). Foram testados 5 corpos de prova para cada um dos oito teores de ligante considerados: 4,22 %, 4,54 %, 4,70 %, 4,86 %, 5,18 %, 5,50 %, 5,82 % e 6,14 %. Porém, como foram incorporadas fibras de sisal com concentrações de 0,3 % e 0,5 % em volume de mistura asfáltica, além da formulação de referência, sem a adição de fibras, tem-se que foi produzido um total de 120 corpos de prova, isto é, 40 para cada formulação.

Em relação à proporção e tamanho da fibra incorporada nas misturas asfálticas, pesquisas prévias (SINGH *et al.*, 2022; KUMAR e RAVITHEJA, 2019; RAMALINGAM, MURUGASAN e NAGABHUSHANA, 2017; SOUSA *et al.*, 2017) mostraram que a adição de pequenas quantidades, usualmente entre 0,3 % e 0,5 % em volume de mistura asfáltica, é suficiente para melhorar as propriedades mecânicas, e com fios de tamanho entre 10 mm e 15 mm. Nesta pesquisa, portanto, foi adotado o tamanho da fibra em 15 mm, em consonância com trabalho desenvolvido por Evaldt (2023).

A dosagem das fibras foi realizada em relação ao volume de mistura asfáltica e, convertido em peso a partir do conhecimento da densidade aparente da formulação de referência.

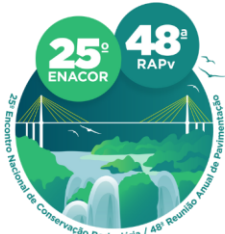
A sequência de ensaios laboratoriais iniciou com a massa específica volumétrica real (MVR) das amostras, a partir do procedimento à vácuo (DNIT-ME 427, 2020), essa medida permitiu calcular o teor de vazios em cada corpo de prova. Utilizando a metodologia Marshall, tornou-se viável determinar, para cada formulação sugerida, as faixas de teores de ligante betuminoso que satisfazem os parâmetros técnicos estabelecidos pela Norma DNIT-ES 031 (2006) para o projeto de misturas asfálticas utilizadas como camada de rolamento.

A partir destas faixas de trabalho, amostras foram produzidas e submetidas ao ensaio de resistência à tração indireta (DNIT-ME 136, 2018), de forma a complementar à análise quanto ao comportamento mecânico do material, a fim de fornecer uma escolha mais assertiva às indicações provenientes do método Marshall. Para este ensaio, 5 corpos de prova de cada dosagem indicada foram produzidos, perfazendo um total de 45 corpos de prova.

A fim de corroborar com critérios adicionais à escolha do teor de ligante de trabalho, foi realizado o ensaio de Duriez a 18 °C (AFNOR NF EN 12697-12, 2018), para verificação da resistência à ação deletéria da água das misturas asfálticas. Foram produzidos 12 corpos de prova para cada teor de cada formulação, totalizando 108 amostras. A cada teor, dois subconjuntos com 6 corpos de prova foram separados. Um subconjunto foi mantido com 50 % de umidade do ar (R), enquanto o outro foi saturado e armazenado em água por 7 dias (r), ambos a 18 °C. Após o condicionamento, a resistência à compressão simples (r/R) de cada subconjunto foi aferida, não devendo ser inferior a 0,7 em cada caso, de acordo com MANUEL LPC (2007).

## RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Figura 3 ilustra os resultados médios de duas determinações para cada teor de ligante nos ensaios de MVR das misturas asfálticas.



19 a 22 de Setembro de 2023  
Foz do Iguaçu - PR  
www.rapvenacor.com.br

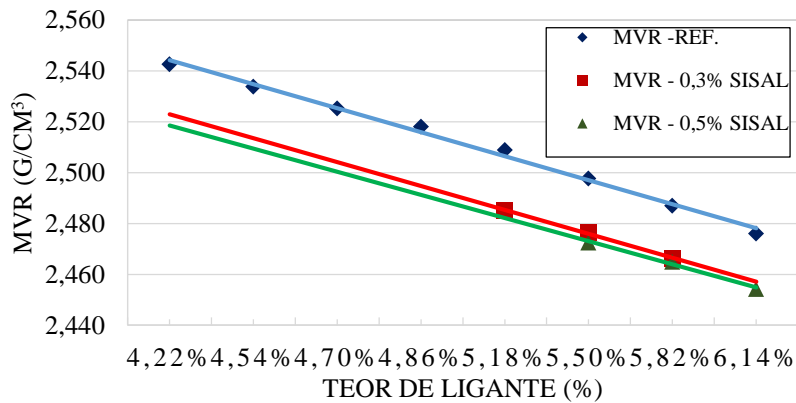


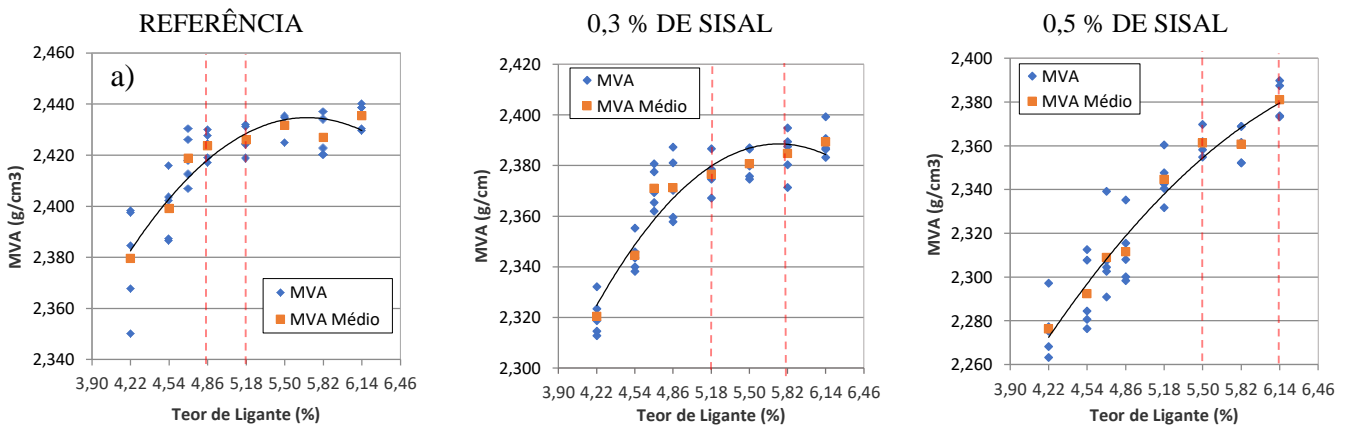
Figura 3. Resultado do MVR para cada formulação.

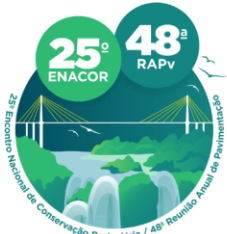
As fibras de sisal formam uma trama emaranhada, como observado no ensaio de MEV, o que cria espaços entre as fibras e aumenta o volume do corpo de prova. Como resultado, a incorporação de sisal na formulação resulta em uma diminuição do valor de MVR. A adição de sisal interfere no contato entre as partículas granulares, aumentando os vazios e, por consequência, o volume da amostra e reduz a massa volumétrica real.

Quanto aos resultados paramétricos obtidos no ensaio Marshall (Figura 4), tem-se que foram analisados para garantir o atendimento dos valores especificados na Tabela 5.

Tabela 3. Valores limites para os parâmetros de dosagem de projeto de misturas asfálticas (DNIT-ES 031, 2006).

Características	Método de ensaio	Camada de rolamento
Porcentagem de vazios, %		3 a 5
Relação betume/vazios	DNER-ME 043 (1995)	75 – 82
Estabilidade mínima, (kgf) (75 golpes)		500
Resistência à tração por compressão diametral estática a 25 °C, mínima, MPa	DNER-ME 138 (2018)	0,65





19 a 22 de Setembro de 2023  
Foz do Iguaçu - PR  
www.rapvenacor.com.br

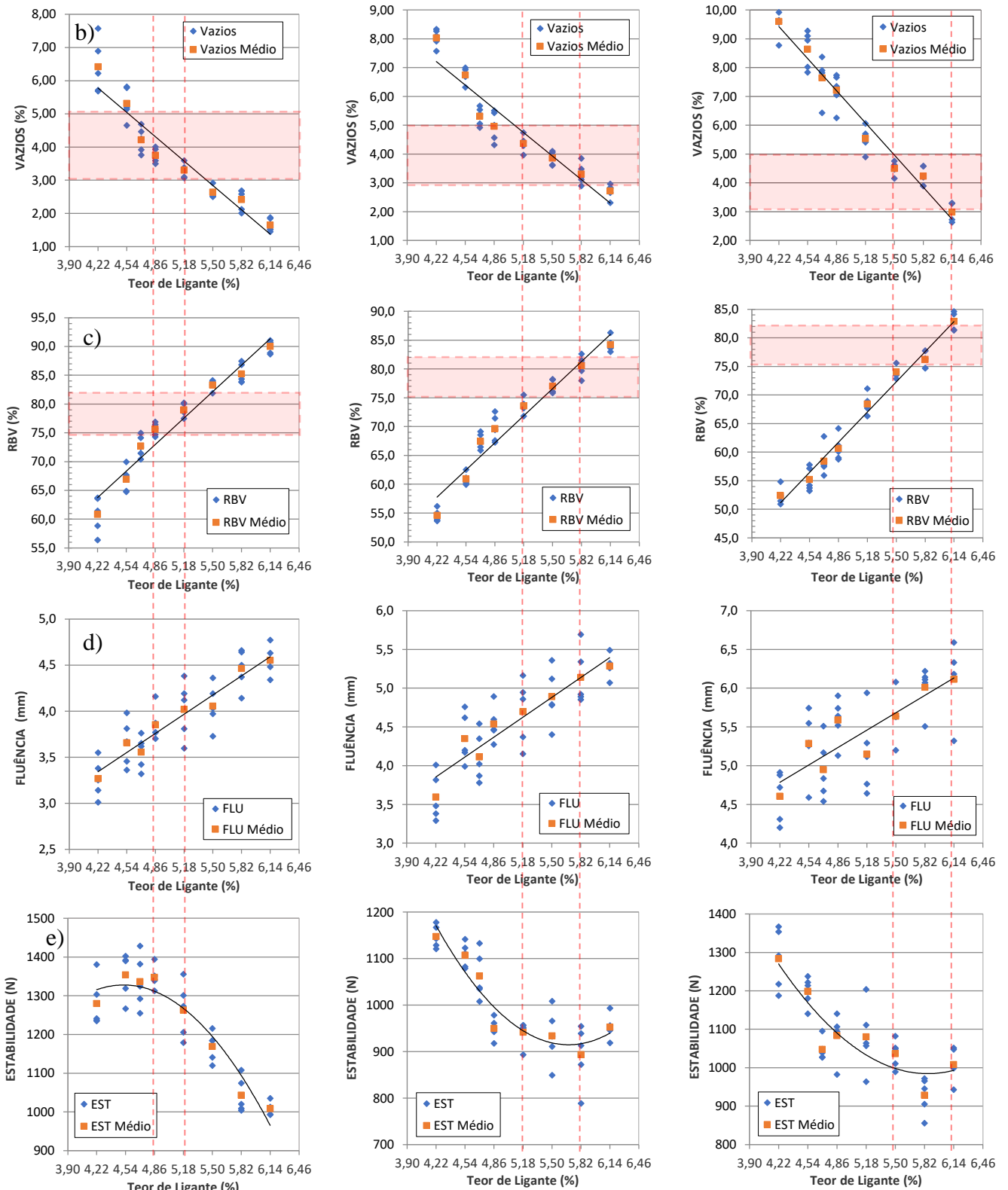
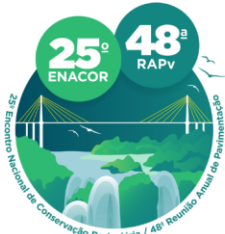


Figura 4. Resultados do ensaio Marshall.

De maneira similar ao que foi observado nos resultados do ensaio de MVR, é possível notar, na Figura 4a, que a massa volumétrica aparente (MVA) diminui de forma gradual à medida que a quantidade





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

[www.rapvenacor.com.br](http://www.rapvenacor.com.br)



de fibra de sisal é acrescentada à mistura. Em suma, a adição da fibra faz com que se aloque nos interstícios das partículas granulares, reduzindo o contato direto entre grãos e aumentando o volume da amostra. Em contraste, pode-se perceber uma tendência inversa no que diz respeito ao volume de vazios (Figura 4b), pois à medida que a proporção de fibra de sisal na mistura aumenta, as amostras apresentam um aumento progressivo no volume de vazios, quando comparadas à mistura de referência. Isso ocorre porque o efeito da trama de sisal dificulta a densificação do material, resultando em um maior espaço entre as partículas.

No que diz respeito à relação betume/vazios (Figura 4c), pode-se observar que as misturas de referência apresentam valores mais elevados, em comparação com as formulações que contêm fibra de sisal. Neste contexto, devido à mistura de referência apresentar um contato direto mais efetivo entre as partículas granulares, há menos espaços vazios a serem ocupados pelo ligante betuminoso, conduzindo mais rapidamente as amostras à saturação. Além disso, a fibra de sisal tem a capacidade de absorver parte do ligante da formulação, logo, à medida que o percentual de fibra aumenta na dosagem, torna-se necessário adicionar mais ligante betuminoso para atingir uma relação betume/vazios semelhante à das amostras de referência.

Os resultados de fluência (Figura 4d) e estabilidade (Figura 4e), indicam que a adição de fibra de sisal afeta negativamente a resistência mecânica do material. Isso ocorre devido aos efeitos discutidos anteriormente, em que a redução do contato entre as partículas aumenta o volume de vazios na mistura. Ainda, quanto maior a quantidade de fibra na mistura, maior é a necessidade de aporte de ligante betuminoso na dosagem, conforme já mencionado, contribuindo para a redução da resistência mecânica do material, sobretudo aos esforços de cisalhamento.

A partir deste ponto, ocorre um efeito lubrificador no contato entre as partículas, gerando uma perda de resistência ao cisalhamento no contato entre os granulares, e conseqüentemente, uma perda de resistência à compressão diametral na prensa Marshall. Nas amostras com fibra de sisal, o gráfico de estabilidade se comporta de maneira inversa.

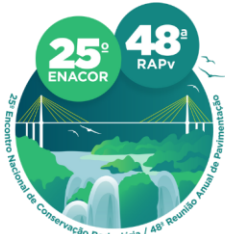
Este efeito ocorre em função de duas condições observadas nas amostras: a primeira é a perda do intertravamento entre as partículas de granulares pela interferência da fibra de sisal, e a segunda é que efeito do aumento nos vazios diminui a resistência mecânica da mistura conforme já abordado. Cabe observar ainda, que, a partir dos teores de 5,82 %, a amostra se encontra com um alto teor de ligante betuminoso, gerando uma pressão fluídica interna em resposta aos esforços mecânicos impostos de compressão diametral.

Por fim, analisando os resultados obtidos em conjunto e os intervalos paramétricos conforme as recomendações da Tabela 5, os potenciais teores de serviço indicados pela metodologia Marshall são apresentados na Tabela 6.

Tabela 4. Teores potenciais de serviço indicados pela metodologia Marshall.

Mistura Asfáltica	Teores Potenciais de Serviço
Referência	4,86 % - 5,18 %
0,3 % de sisal	5,18 % - 5,82 %
0,5 % de sisal	5,50 % - 6,14 %

Entretanto, verifica-se que a partir do ensaio Marshall não é possível obter resultados que permitam uma escolha definitiva e direta de apenas um teor de ligante betuminoso de serviço para cada formulação, apenas uma faixa de valores potenciais de trabalho. Diante do exposto, os ensaios de tração indireta e Duriez a 18 °C foram realizados a fim de fornecer subsídios complementares à



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

www.rapvenacor.com.br



escolha do teor de serviço definitivo em cada caso. Para tanto, considerando as faixas de trabalho indicadas no ensaio Marshall (Tabela 6), foram escolhidos os seguintes teores para cada formulação:

- Referência: 4,70 %, 4,86 % e 5,18 %;
- 0,3 % de sisal: 5,18 %, 5,50 % e 5,82 %;
- 0,5 % de sisal: 5,50 %, 5,82 % e 6,14 %.

A partir do ensaio de tração indireta verifica-se a tendência parabólica do comportamento mecânico das misturas asfálticas, com a indicação direta de valores de pico de resistência ao cisalhamento das amostras, a saber: referência (4,86 %), 0,3 % (5,50 %) e 0,5 % (5,86 %) de sisal.

É possível observar também que a interferência da fibra de sisal no contato direto entre os granulares, diminui o intertravamento entre partículas, e conseqüentemente, a resistência mecânica da mistura. Desta forma, como as formulações contendo fibra de sisal apresentaram resistência ao cisalhamento bem inferiores às amostras de referência, verifica-se pelos resultados obtidos que a referida fibra não é um material contributivo ao provimento do acréscimo de resistência mecânica às misturas asfálticas. Porém, entre as amostras contendo fibra de sisal, o aumento do teor de incorporação na formulação, de 0,3 % para 0,5 %, aportou pequeno acréscimo na resistência mecânica das amostras, devido à maior densidade de fibras atuar na inibição da propagação de trincamento no corpo de prova durante a aplicação do esforço de tração indireta. A Figura 5 ilustra os resultados obtidos para todas as formulações testadas.

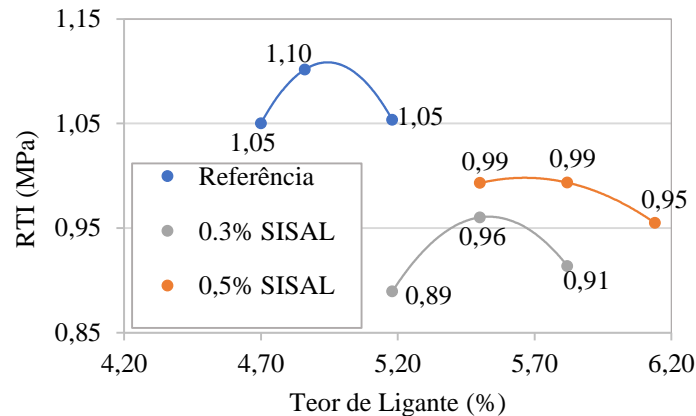


Figura 5. Resultados médios do ensaio de tração indireta.

No que diz respeito à ação deletéria da água analisada no ensaio de Duriez a 18 °C, foram escolhidos os mesmos teores de ligante betuminoso utilizados no ensaio de tração indireta, em que a Figura 6 apresenta os resultados obtidos.

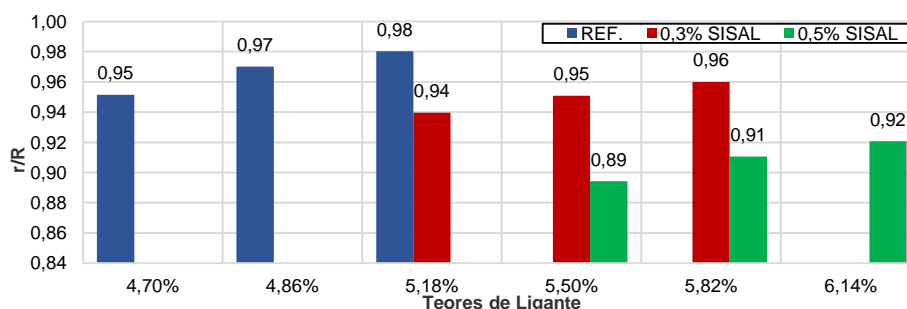
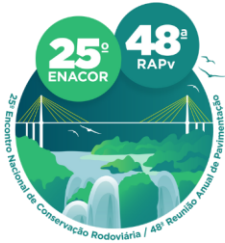


Figura 6. Gráfico da relação r/R para ensaio de Duriez.



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

[www.rapvenacor.com.br](http://www.rapvenacor.com.br)



Observando os resultados obtidos, tem-se que o aumento no teor de ligante reduz a quantidade de vazios nos interstícios das misturas asfálticas e, conseqüentemente, diminui a penetração da água nas formulações, tornando as misturas menos suscetíveis ao seu efeito deletério.

No entanto, o aumento do percentual de sisal na dosagem torna as misturas asfálticas mais suscetíveis à ação da água, devido ao aumento do volume de vazios gerado pelo efeito trama, o qual possibilita maior facilidade à da água nas amostras.

Além disso, a trama formada pelas fibras de sisal absorve parte do ligante betuminoso das dosagens, contribuindo para a redução da espessura da película que envolve os granulares e, ato contínuo, da resistência mecânica das misturas asfálticas.

Desta forma, depurando as análises dos resultados dos ensaios de tração indireta e Duriez, conclui-se que os teores de 4,86 %, 5,50 % e 5,82% são os mais indicados para compor as dosagens das formulações de referência, com 0,3 % e 0,5 % de sisal, respectivamente.

## CONCLUSÕES

A análise de MEV da fibra sisal revelou que as fibras se entrelaçam formando uma trama emaranhada e criando vazios, o que confere volumetria considerável ao material. Essa característica foi confirmada pelos resultados de MVR, MVA e teor de vazios, pois o MVR e MVA diminuem progressivamente à medida que se aumenta o teor de fibra de sisal, e o volume de vazios, de forma oposta, aumenta consideravelmente.

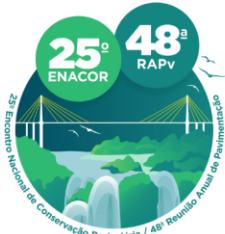
Essa tendência, em conformidade com os resultados obtidos no ensaio Marshall, mostraram que a incorporação da fibra na mistura, diminui o contato entre os granulares, e da mesma forma, a resistência mecânica.

Em relação ao consumo de ligante betuminoso, a adição de fibras de sisal aumentou o consumo pelas misturas asfálticas, devido à textura superficial escamosa das paredes celulares das fibras, que tendem a absorver parte do ligante incorporado à mistura. Essa absorção reduz a espessura de ligante betuminoso que envolve os granulares, diminuindo a resistência mecânica, tal como à tração indireta, e aumentando a ação deletéria da água.

Embora o aumento do teor de fibra de sisal possa melhorar a capacidade de reduzir a propagação de trincas das formulações, os resultados obtidos nesta pesquisa indicaram que a adição das referidas fibras em misturas asfálticas densas não apresenta benefícios significativos em relação às propriedades mecânicas estudadas. Além disso, esta adição requer um maior consumo de ligante betuminoso nas dosagens, acarretando em um impacto econômico maior no custo do produto final.

## REFERÊNCIAS

- ABTAHI S. M., SHEIKHZADEH M., HEJAZI S. M. Fiber-reinforced asphalt-concrete – A review. *Construction and building materials*, V. 24, p. 871-877, 2010. doi:10.1016/j.conbuildmat.2009.11.009.
- AFNOR NF EN 12697-12 (2018), Mélanges bitumineux - Méthodes d'essai - Partie 12: Détermination de la sensibilité à l'eau des éprouvettes bitumineuses. Association Française de Normalisation. Paris, França.
- ANDRADE, V. D. et al. Impacto da formulação de composições granulométricas nas propriedades mecânicas e funcionais de misturas asfálticas densas. *Revista A Matéria*. 2020. ISSN 1517-7076 artigos e-12905.
- BARRA, B. S. Avaliação da ação da água no módulo complexo e na fadiga de misturas asfálticas densas. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2009.
- MASHAAN N.; KARIM M.; KHODARY F.; SABOO N.; MILAD A. Bituminous Pavement Reinforcement with Fiber: A Review. *CivilEng*. v. 2, p. 599-611, jul. 2021. <https://doi.org/10.3390/civileng2030033>



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

[www.rapvenacor.com.br](http://www.rapvenacor.com.br)



- BERNUCCI, B. L.; MOTTA, L. M. G.; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B. Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros. 2. ed. Rio de Janeiro: Petrobrás: ABEDA, 2022. 750 pg. ISBN: 978-85-69658-02-3.
- BRASIL. Ministério da Infraestrutura. Empresa de Planejamento e Logística. Plano Nacional de Logística 2035, 2021.
- CNI - CONFEDERAÇÃO NACIONAL DAS INDUSTRIAS. Investimentos públicos e as rodovias federais no Brasil: Evolução e perspectivas – Brasília, 2021. 55 p. CDU: 330.322.14.
- DNIT ME 136/2018. Pavimentação asfáltica – Misturas asfálticas –. Determinação da resistência à tração por compressão diametral – Método de ensaio. Instituto de Pesquisas Rodoviárias (IPR), Rio de Janeiro, RJ. 2018, 9p.
- DNER-ME 043 (1995), Misturas Betuminosas a quente - Ensaio Marshall. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes.
- DNIT (2006), Manual de Pavimentação. Publicação IPR-719. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, 274 p.
- DNIT-ES 031 (2006), Pavimentos Flexíveis – Concreto Asfáltico – Especificação de Serviço. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes.
- DNIT-ME 427 (2020), Pavimentação – Misturas asfálticas – Determinação da densidade relativa máxima medida e da massa específica máxima medida em amostras não compactadas.
- EVALDT F. P. Avaliação do comportamento funcional de misturas asfálticas densas do tipo BBSG com a incorporação de fibra de sisal. 2023. Dissertação de Mestrado (Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciências Mecânicas) – Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2022.
- FRONZA, R. C. Avaliação comparativa dos parâmetros de dosagem de misturas asfálticas densas com a incorporação de resíduo de construção e demolição. 2022. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em engenharia civil de infraestrutura) – Centro Tecnológico de Joinville, Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2022.
- MANUEL LPC. Manuel LPC d'aide à la formulation des enrobés. 2007. 199 p. Groupe de travail RST "Formulation des enrobés". Laboratoire Central des Ponts et Chaussées. Paris, França, 2007.
- MARTIN, A. R.; MARTINS, M. A.; MATTOSO, L. H. C.; SILVA, O. R. R. F. Caracterização química e estrutural de fibra de sisal da variedade Agave Sisalana. *Polímeros: Ciência e Tecnologia*, v. 19, p. 40-46, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0104-14282009000100011>.
- MEDINA, J. C. (1954), O sisal. Secretaria da Agricultura do Estado de São Paulo, 286 p. São Paulo, SP.
- MWAIKAMBO, L. Y. e ANSELL, M. P. (2002), Chemical modification of hemp, sisal, jute, and kapok fibers by alkalinization. *Journal of Applied Polymer Science*, Vol. 84, Issue 12, pp.2222-2234. DOI: <https://doi.org/10.1002/app.10460>
- PAN, T.; TUTUMLUER, E.; CARPENTER, S. H. Effect of Coarse Aggregate Morphology on Permanent Deformation Behavior of Hot Mix Asphalt. *Journal Of Transportation Engineering*, v. 132, n. 7, p.580-589, jul. 2006. American Society of Civil Engineers (ASCE). [http://dx.doi.org/10.1061/\(asce\)0733-947x\(2006\)132:7\(580\)](http://dx.doi.org/10.1061/(asce)0733-947x(2006)132:7(580)).
- RADETIĆ, M. (2013), Functionalization of textile materials with TiO2 nanoparticles. *Journal of Photochemistry and Photobiology C: Photochemistry Reviews*, Vol. 16, pp. 62-76, ISSN 1389-5567. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jphotochemrev.2013.04.002>.
- RAMALINGAM, S.; MURUGASAN, R.; NAGABHUSHANA, M.N. Laboratory performance evaluation of environmentally sustainable sisal fibre reinforced bituminous m. *Construction and Building Materials*, [S.L], v. 148, n. 1, p. 22-29, maio 2017. Mensal.
- SINGH G., SINGH S., KUMAR R., CHOCHAN J. Exploration of sisal fibre for modification of bituminous mix. *Materials today: Proceedings*, v. 48, part 5, p. 1352-1355, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.09.070>.
- SOUSA, M. N. DE M.; LUCENA, L. C. DE F. L.; COSTA, L. F. DA; SILVA, Y. DE M. Estudo de aplicabilidade da adição de fibras de sisal em misturas asfálticas do tipo SMA. XXXI Congresso Nacional de Pesquisa em Transporte da ANPET, Recife, 2017.