

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

AVALIAÇÃO TRIBOLÓGICA DE COMPÓSITOS REFORÇADOS POR FIBRAS DE SISAL E
DE VIDRO

por

Maurício Ebeling

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, novembro de 2018

AVALIAÇÃO TRIBOLÓGICA DE COMPÓSITOS REFORÇADOS POR FIBRAS DE SISAL E
DE VIDRO

por

Maurício Ebeling

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
ENGENHEIRO MECÂNICO
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof^a. Dr^a. Thammy Cristina Hayashi
Coordenadora do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: **Projeto e Fabricação**

Orientador: Prof. Dr. Patric Daniel Neis

Comissão de Avaliação:

Prof. Dr. Patric Daniel Neis

Prof. Dr. Ney Francisco Ferreira

Prof^a. Dr^a. Cintia Cristiane Petry Mazzaferro

Porto Alegre, 16 de novembro de 2018.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à minha família.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por me acompanhar e ser um amigo de todas as horas.

À minha família, especialmente aos meus pais Jorge e Bernardete, pelo exemplo de valores, de educação e de carinho que sempre foram e por se fazerem presentes em todos os dias, apesar da distância.

Ao professor e amigo Patric Daniel Neis, pela orientação, pelos sábios conselhos e por compartilhar seu conhecimento e suas histórias. Obrigado por ser um exemplo de pesquisador e profissional.

À equipe do LATRIB, pelo auxílio técnico e pelo apoio, em especial ao Gustavo Gehlen, pela amizade e companheirismo durante os ensaios necessários para este trabalho.

Aos amigos que a vida me proporcionou, sem eles nada seria possível.

EBELING, M. **Avaliação Tribológica de Compósitos Reforçados por Fibras de Sisal e de Vidro**. 2018. 25 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018.

RESUMO

Este trabalho tem por objetivo avaliar o comportamento tribológico de compósitos reforçados com fibras de sisal, fibras de vidro e do compósito híbrido (sisal + vidro) em matriz de poliéster, para diferentes conteúdos de fibras, utilizando o ensaio de Pino-sobre-Disco. Os ensaios foram realizados no tribômetro do Laboratório de Tribologia (LATRIB) da UFRGS, utilizando parâmetros controlados de força, velocidade de rotação do disco e de tempo. O principal indicador de desempenho avaliado nos ensaios foi o desgaste volumétrico. O aumento de 20 para 40% no conteúdo de fibras dos compósitos levou a um maior desgaste no compósito híbrido, e a um menor desgaste nos compósitos com fibras de sisal e de vidro. Empregou-se microscopia ótica para análise da interação entre as fibras de sisal e de vidro no compósito híbrido. Algumas amostras de compósitos de fibras de sisal apresentaram excesso de desmoldante (cera de carnaúba) na superfície, oriundo do processo de fabricação, o que pode ter impedido o contato direto entre as fibras de sisal e a contraparte (disco), ocasionando um baixo desgaste nessas amostras. Os resultados indicaram o compósito de sisal, com 40% de fibras em volume, como o de menor desgaste volumétrico entre todas as classes ensaiadas nesse estudo e indicaram o compósito híbrido como uma boa opção para substituir o compósito reforçado apenas por fibras de vidro, em aplicações que demandem resistência ao desgaste.

PALAVRAS-CHAVE: Compósito híbrido, fibras de sisal, Pino-sobre-Disco, desgaste.

EBELING, M. Tribological Evaluation of Composites Reinforced with Sisal and Glass Fibers. 2018. 25 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018.

ABSTRACT

This study aims to evaluate the tribological behavior of composites reinforced with sisal fibers, glass fibers and the hybrid composite (sisal + glass) in a polyester matrix, for different fiber contents, using the Pin-on-Disk test. The tests were performed in the tribometer of the Laboratório de Tribologia (Tribology Laboratory) of UFRGS, using controlled parameters of force, disk speed rotation and time. The main parameter evaluated in the tests was the volumetric wear. The increase from 20% to 40% in the fiber content of the composites led to greater wear on the hybrid composite, and lower wear on the composites with sisal fibers and glass fibers. Optical microscopy was used to analyze the interaction between sisal and glass fibers in the hybrid composite. Some samples of sisal fibers composites showed excess of release agent (carnauba wax) on the surface, from the manufacturing process, which may have prevented direct contact between the sisal fibers and the counterpart (disc), causing a low wear in these samples. The results presented the composite of sisal, with 40% fibers in volume, with the lowest volumetric wear among all the classes tested in this study, and indicated the hybrid composite as a good option to replace the composite reinforced only with glass fibers, in applications that require wear resistance.

KEYWORDS: Hybrid composites, sisal fibers, Pin-on-Disc, wear.

ÍNDICE

	Pág.
1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVOS	1
2.1 Objetivo Geral	1
2.2 Objetivos Específicos	1
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	2
3.1 Compósitos Híbridos	2
3.2 Fibra de Sisal	2
3.3 Ensaio Pino-sobre-Disco	3
3.4 Trabalhos Envolvendo Tribologia de Compósitos com Fibras Naturais	3
4. METODOLOGIA	4
4.1 Corpos de Prova	4
4.2 Disco	5
4.3 Parâmetros de Ensaio	6
4.4 Método para Determinação do Desgaste	7
4.5 Obtenção das Imagens	8
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	8
5.1 Desgaste dos Compósitos com 20% de Fibras em Volume	8
5.2 Desgaste dos Compósitos com 40% de Fibras em Volume	10
5.3 Comparativo Entre os Compósitos com 20% e 40% de Fibras em Volume	12
6. CONCLUSÕES	13
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	13
ANEXO A	15
APÊNDICE A	16
APÊNDICE B	18

1. INTRODUÇÃO

Durante os últimos anos novas técnicas de cultivo, extração e processamento de fibras naturais permitiram o desenvolvimento de novas classes de compósitos sustentáveis, em particular compósitos híbridos bio-reforçados baseados no uso de fibras naturais e fibra de vidro [Filho et al., 2018]. Há uma demanda justificada e necessária em se buscar materiais que proporcionem eficiência energética, tanto em seu processo produtivo quanto na sua aplicação. Como uma boa alternativa para a substituição de metais e de fibras sintéticas (materiais retirados de recursos finitos e que geram uma alta taxa de resíduos poluentes) aparecem as fibras naturais, com vantagens ecológicas (recicláveis, biodegradáveis, retiradas de fontes renováveis e carbono “free” – quando compostadas ou incineradas liberam a mesma quantidade de dióxido de carbono consumida durante seu desenvolvimento) e vantagens à saúde (menor irritação dérmica e respiratória). Segundo Chand e Fahim, 2008, as fibras naturais são vantajosas devido a sua elevada rigidez específica, seu reduzido peso específico, suas propriedades de isolamento acústico e seu baixo custo, atrativos para o projeto e fabricação de engrenagens, rolamentos, vedações e freios. Gurunathan et al., 2016, mencionam que a produção de materiais advindos de matérias primas renováveis deve crescer cerca de 18% em 2020 e 25% em 2030.

Senthilkumar et al., 2018, mencionam que a disponibilidade de fibras naturais e a facilidade para o seu cultivo levaram inúmeros pesquisadores a estudar a viabilidade de sua aplicação como reforço em compósitos. Nesse contexto, o sisal se destaca por possuir propriedades mecânicas notáveis e satisfatórias. Ainda, o estudo de Senthilkumar et al., 2018, também mostrou que a presença de fibras de sisal em compósitos com matriz de poliéster levou a melhorias na resistência à flexão e resistência ao impacto. Experimentos conduzidos por outros pesquisadores também sugerem que as fibras naturais resistem à deterioração em água salgada [Chand e Fahim, 2008] e têm propriedades tribológicas comparáveis às fibras sintéticas [Omran et al., 2016]. No entanto, há relativamente poucas informações disponíveis na literatura sobre o desempenho tribológico (atrato e desgaste) de materiais compósitos reforçados com fibras naturais, especialmente o sisal. Deve-se levar em conta ainda que restrições têm sido impostas por instituições governamentais pelo mundo a fora quanto ao uso de elementos poluentes, como cobre e asbesto (presentes em compósitos de materiais de fricção, como lonas e pastilhas de freio). Assim, um estudo com materiais naturais pode proporcionar um olhar diferente sobre a utilização dos mesmos em aplicações que demandem resistência ao desgaste.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Este trabalho tem por objetivo estabelecer um estudo comparativo entre as propriedades tribológicas de três classes de compósitos de matriz de poliéster: (i) reforçados com fibras naturais de sisal; (ii) reforçados com fibras de vidro; (iii) o compósito híbrido (reforçado com fibras de sisal e com fibras de vidro), utilizando o ensaio de Pino-sobre-Disco.

2.2 Objetivos Específicos

- Realização do ensaio de Pino-sobre-Disco no tribômetro disponível no Laboratório de Tribologia da UFRGS;
- Obtenção de imagens ópticas (através de microscopia e estereoscopia) das amostras ensaiadas para avaliar a condição superficial e a forma de interação entre as fibras de sisal e de vidro, no compósito híbrido;
- Análise do desgaste em função da perda em volume das amostras, através da relação entre a perda de massa e da densidade aparente média.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Compósitos Híbridos

A norma ASTM D3878-16 define um material compósito como sendo a combinação de dois ou mais materiais, insolúveis entre si, resultando em um material de engenharia com propriedades diferentes das de seus constituintes. Pelo menos um desses materiais é a fase dispersa (reforço) e o outro é a fase contínua (matriz).

Compósitos híbridos consistem em duas ou mais fases distintas de reforço combinadas na mesma matriz. Os reforços podem incluir dois tipos de fibras individuais ou uma combinação de fibras e partículas.

Com o uso de fibras naturais como reforço de matrizes poliméricas o mais importante fator a ser levado em conta é a adesão entre fibra e matriz, responsável direta pelo desempenho mecânico e tribológico do compósito. O papel da matriz é aglutinar as fibras e transferir para essas as cargas aplicadas sobre o compósito, através de tensões de cisalhamento na interface fibra-matriz [Wambua et al., 2003]. Normalmente, a fibra vegetal possui baixa adesão à matriz devido à natureza hidrofílica (tem a capacidade de absorver água) da primeira e à natureza hidrofóbica (não absorve ou não se mistura com a água) da última, resultando em um compósito com baixa resistência. Essa desvantagem pode ser contornada quando a superfície da fibra é modificada através de tratamentos físicos: o tratamento com plasma frio proporciona a incorporação de grupos funcionais na superfície da matriz [Cordeiro, 2016]. E, também, tratamentos químicos: as fibras de sisal tratadas por agentes de acoplamento, como o silano, possuem baixos conteúdos de vazios e baixa absorção de umidade devido ao caráter hidrofóbico proporcionado à superfície da fibra. Outros exemplos de tratamentos químicos incluem: (i) tratamento alcalino (por NaOH), que atua de forma a aumentar a rugosidade superficial das fibras; (ii) tratamento com ácido acético, o qual reduz a natureza higroscópica (tendência de absorver umidade) das fibras naturais e aumenta a estabilidade térmica dos compósitos [Li et al., 2007].

Neste trabalho, não foi utilizado nenhum método de tratamento superficial para as fibras naturais de sisal.

3.2 Fibra de Sisal

A fibra de sisal é extraída das folhas da planta de sisal (*Agave Sisalana*). Essa planta é encontrada em todo o mundo, principalmente nas regiões tropicais e subtropicais [Ramesh et al., 2017], e pode ser produzida sem o uso de pesticidas ou fertilizantes químicos. A COSIBRA (Companhia Sisal do Brasil), 2015, colocava o Brasil como maior produtor de sisal no mundo, com destaque para a Bahia como o Estado com a maior produção nacional.

Segundo Senthilkumar et al., 2018, geralmente uma planta de sisal produz entre 200 e 250 folhas, sendo que cada folha pesa cerca de 600 g e produz de 3 a 5% de fibras em peso. Os 95 a 97% restantes constituem os chamados resíduos de beneficiamento - utilizados como adubo orgânico, ração animal e pela indústria farmacêutica [Milanese, 2008]. No entanto, tal composição pode variar de acordo com fatores como o local de cultivo e a idade da planta. Um pedaço de fibra de sisal não é um único filamento, como as fibras de carbono ou de vidro, mas sim um feixe de agregado celular que consiste em mais de 100 células hexagonais e irregulares. A fibra é, na verdade, um conjunto de subfibras ocas. O comprimento da fibra de sisal varia entre 1,0 e 1,5 m [Xin et al., 2007] e suas extremidades são largas e sem corte (Figura 3.1). O estudo de Milanese, 2008, indicou que aplicações típicas do sisal incluem: confecção de fios, cordas, redes para pesca e tapetes; revestimentos das paredes traseiras e laterais de caminhões leves e médios, em substituição às fibras de vidro, e como material para estofamento.



Figura 3.1 – Fibras de sisal [SISALL, 2017].

3.3 Ensaio Pino-sobre-Disco

É uma técnica aplicada para se determinar o desgaste provocado pelo deslizamento de contatos com áreas reduzidas e segue a norma ASTM G99-04. Se dá pelo posicionamento de um pino perpendicular a um disco circular plano, sendo que a máquina de testes pressiona o pino contra o disco com uma força especificada e rotaciona o disco, ou promove movimentos circulares do pino (em relação ao disco), para que haja um movimento discordante entre pino e disco.

A determinação do desgaste geralmente é feita através da variação de massa (medida antes e após o ensaio) do pino [Garcia et al., 2012], ou através da marca deixada pela esfera (pino) sobre o disco [ASTM G99-04].

3.4 Trabalhos Envolvendo Tribologia de Compósitos com Fibras Naturais

Durante ensaios tribológicos as amostras (pinos) podem atingir altas temperaturas, o que seria problemático para as fibras naturais. Segundo Omrani et al., 2016, para temperaturas acima de 150°C, observa-se uma diminuição no coeficiente de atrito e um aumento da taxa de desgaste como resultado da degradação da fibra de sisal. Tharmaraj et al., 2016, mencionam que parâmetros como a carga aplicada no pino e a velocidade de rotação do disco, podem afetar diretamente a performance ao desgaste de compósitos poliméricos reforçados com fibras naturais.

Chand e Dwivedi, 2007, investigaram o desgaste em compósitos de matriz epóxi reforçados com fibras de sisal, para diferentes orientações de fibra (paralelas, perpendiculares e normais à direção de deslizamento), comparando os resultados com os do epóxi puro. A amostra com fibras orientadas de forma paralela à direção do deslizamento apresentou a maior taxa de desgaste entre as amostras de compósitos, ainda que menor do que o do epóxi puro. O menor desgaste registrado foi o da amostra com fibras dispostas na direção normal (entrando no plano do disco) a do deslizamento, o que é explicado pelo menor contato entre seções transversais das fibras de sisal com partículas abrasivas.

Chand e Dwivedi, 2008, também analisaram o comportamento de desgaste em ensaios de deslizamento pino sobre disco de compósitos sisal-poliéster (pinos), utilizando um disco de aço inoxidável, para distância e velocidade de deslizamento constantes e com variação da carga aplicada sobre o pino (10 – 100 N). Os pinos utilizados possuíam diâmetro de 10 mm. Os autores estudaram o efeito do conteúdo de fibras de sisal e do tratamento químico de silano sobre a performance tribológica dos compósitos. Os seguintes conteúdos de fibra foram ensaiados: 27% de fibras de sisal (sem tratamento), 42% de fibras de sisal (sem tratamento) e 27% de fibras de sisal tratadas com silano. O aumento no conteúdo de fibras reduziu a taxa de desgaste do compósito. O tratamento com silano melhorou a interação entre as fibras e a matriz de poliéster, proporcionando maior coeficiente de atrito e menor desgaste. O resultado

do estudo apresentou a seguinte ordem decrescente de desgaste: poliéster + sisal 27% > poliéster + sisal 42% > poliéster + silano + sisal 27%.

Xin et al., 2007, foram os primeiros a avaliar as propriedades tribológicas da fibra de sisal como reforço em compósitos de materiais de fricção para pastilhas de freio. Para tanto, confeccionaram compósitos com fibras de sisal utilizando os principais componentes normalmente aplicados em pastilhas de freio automotivas convencionais (resina fenólica, cobre, barita, feldspato e óxido de zinco). As fibras de sisal receberam tratamento químico de NaOH e silano, para melhorar a adesão aos demais componentes e, assim, evitar a sua degradação em altas temperaturas. O compósito de pastilha de freio com fibras de sisal teve seu desempenho comparado com o de pastilhas de freio comerciais, reforçadas com asbesto, em um teste de fricção com velocidade constante e controle de tempo. A faixa de temperatura dos testes foi de 100°C a 350°C. Conforme os autores, os resultados obtidos colocaram a fibra de sisal como uma boa opção em substituição ao asbesto nos compósitos para pastilhas de freio pelo alto coeficiente de atrito proporcionado ao compósito.

4. METODOLOGIA

4.1 Corpos de Prova

A confecção dos compósitos ocorreu no Instituto Federal Sul Riograndense. As fibras de sisal e os feixes do *Roving* (cordão formado por várias mechas de microfibras) de vidro foram cortados no comprimento de 4 cm. As fibras de sisal foram lavadas em água destilada e então colocadas em uma estufa a 60°C por 180 minutos, para secagem. Posteriormente, as fibras de sisal e de vidro foram distribuídas manualmente, de forma aleatória, dentro de bandejas (uma bandeja contendo fibras de sisal, uma contendo fibras de vidro e uma terceira bandeja contendo as duas variedades de fibras). As bandejas que continham fibras de sisal foram submetidas à temperatura de 105°C por 30 minutos para remoção de umidade. Em seguida, as bandejas foram colocadas em uma prensa hidráulica para que se fizesse a compactação das fibras, a uma pressão de 6 toneladas e temperatura ambiente, a fim de que se formassem mantas de fibras. Em moldes quadrados, com 15 cm de comprimento, realizou-se a aplicação de um desmoldante de cera de carnaúba, para evitar a adesão das chapas de compósito (a serem confeccionadas) no molde. Despejou-se uma mistura de resina de poliéster insaturado e iniciador Butanox nos moldes. As mantas de fibras compactadas foram colocadas sobre a mistura e o compósito foi, então, confeccionado por compressão a quente, realizada na pressão de 3 bar a 80°C, durante 1 hora e 10 minutos. Posteriormente realizou-se pós-cura na temperatura de 60°C por 4 horas. Desta maneira, foram geradas chapas de compósitos com 3,5 mm de espessura. Os seguintes materiais foram utilizados: fibra de sisal obtida de uma corda; fibra de vidro-E obtida de *Rovings*; resina poliéster insaturada ortoftálica e iniciador de cura Butanox M-50; além de cera de carnaúba como desmoldante.

As amostras foram fabricadas com percentuais de 20 e 40% de fibra (reforço) em volume, nas proporções de 100:0, 50:50 e 0:100 (sisal:vidro), como é ilustrado na Figura 4.1.

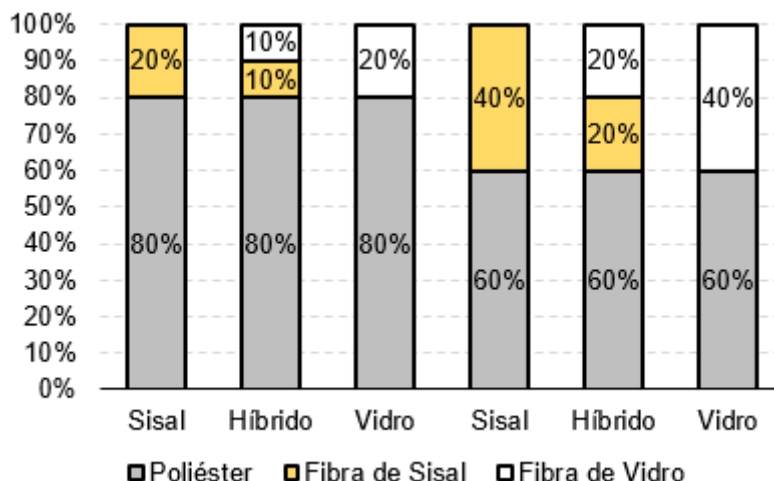


Figura 4.1 – Percentuais volumétricos de poliéster, fibra de sisal e fibra de vidro nos compósitos.

Uma vez confeccionadas as chapas de fibras, as mesmas foram usinadas em formato circular e coladas em cima de um porta amostras, a fim de torná-las aptas para instalação no tribômetro. A geometria dos corpos de prova, os quais possuem diâmetro de 18 mm (diâmetro das amostras circulares dos compósitos, desconsiderando a borda do porta amostras), é apresentada na Figura 4.2.

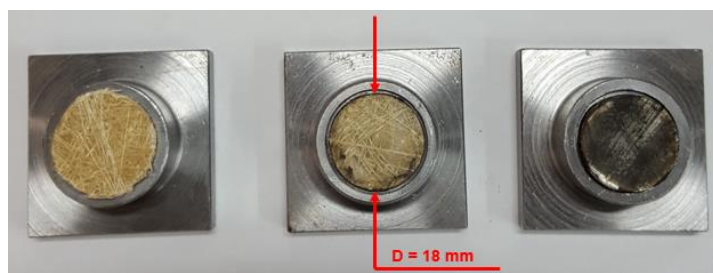


Figura 4.2 – Geometria dos corpos de prova utilizados nos ensaios: amostra de fibras de sisal (à esquerda), híbrida (centro) e de fibras de vidro (à direita), com 20% de fibras em volume.

4.2 Disco

Para todos os ensaios foi utilizado um mesmo disco de aço SAE 1020 retificado, sendo que antes do ensaio de cada amostra o disco era lixado, utilizando-se lixas de gramatura 180, 240, 320, 500, 600 e 1200 até que a superfície do disco atingisse uma rugosidade a mais próxima possível de 20 μm , assegurando-se assim a mesma rugosidade para todos os ensaios. A Figura 4.3 apresenta o disco após o ensaio de uma amostra híbrida.

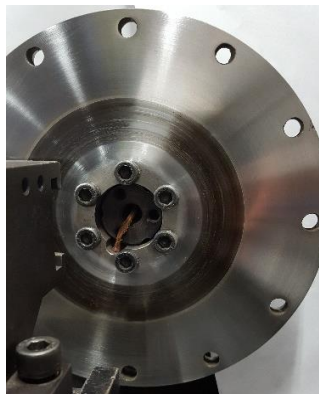


Figura 4.3 – Disco de aço SAE 1020, após ensaio de uma amostra híbrida.

4.3 Parâmetros de Ensaio

Os ensaios das amostras foram realizados no tribômetro (Figura 4.4) disponível no Laboratório de Tribologia (LATRIB) da UFRGS, utilizando a técnica de Pino-sobre-Disco.



Figura 4.4 – Tribômetro do LATRIB – UFRGS [Adaptado: Pavlak et al., 2017].

De acordo com Neis, 2008, no tribômetro utilizado o coeficiente de atrito é determinado por uma relação entre o torque, a força normal e o raio de deslizamento (distância entre o centro do disco e da amostra), conforme a Equação 4.1:

$$\mu = \frac{T}{RF_N} \quad (4.1)$$

onde μ é o coeficiente de atrito [adimensional], T é o torque medido durante o ensaio [Nm], F_N é a força normal aplicada [N] e R é o raio de deslizamento [m], correspondente a 0,043 m para os ensaios realizados. As incertezas do equipamento encontram-se no Anexo A.

Para os compósitos com 20% de fibras em volume, foram empregadas 8 amostras de fibra de sisal (5 delas com excesso de desmoldante, oriundo do processo de fabricação, e 3 amostras com pouco desmoldante), 4 amostras de fibra de vidro e 4 amostras híbridas (todas fabricadas com pouco desmoldante no processo de compressão). Visando entender a influência do conteúdo de fibra, foram avaliadas ainda amostras com 40% de fibras em volume do compósito. Neste caso, foram ensaiadas 4 amostras de fibras de sisal (3 delas com excesso de desmoldante), 4 de fibras de vidro e 4 híbridas (todas com pouco desmoldante). A Tabela 4.1 apresenta a relação das amostras utilizadas nos ensaios. Tendo em vista que as amostras foram fabricadas por terceiros e cedidas ao LATRIB quando finalizadas, utilizou-se um critério

visual, através das imagens estereoscópicas, para verificar, de forma qualitativa, quais amostras apresentavam excesso de desmoldante ou pouco desmoldante

Tabela 4. 1 – Relação das amostras utilizadas nos ensaios.

Conteúdo de Fibras	Nº de amostras de sisal		Nº de amostras híbridas		Nº de amostras de vidro	
	Excesso de desmoldante	Pouco desmoldante	Excesso de desmoldante	Pouco desmoldante	Excesso de desmoldante	Pouco desmoldante
20%	5	3	-	4	-	4
40%	3	1	-	4	-	4

A Tabela 4.2 exibe os parâmetros de operação utilizados no tribômetro para a realização dos ensaios de desgaste. Foram realizadas 12 repetições por amostra, cada repetição com duração de 300 segundos.

Tabela 4.2 – Parâmetros adotados nos ensaios.

Velocidade tangencial [m/s]	Força normal [N]	Rotação [RPM]	Distância por repetição [m]	Repetições
3	150	718	900	12

Durante cada uma das 12 repetições, foram avaliados o coeficiente de atrito de cada amostra e a variação de temperatura causada no disco, visto que são fatores que podem auxiliar na avaliação de desgaste.

A temperatura inicial dos testes foi de 40°C, medida através de um termopar tipo K instalado a 1 mm da superfície do disco. No decorrer do escorregamento do pino sobre o disco, soprou-se ar refrigerante sobre o disco, evitando-se assim que a temperatura do processo ultrapassasse 100°C.

4.4 Método para Determinação do Desgaste

O desgaste das amostras foi medido através da mudança de massa do corpo de prova, sendo essa mudança quantificada através de uma balança eletrônica de precisão [Lee et al., 2007]. Nesse trabalho fez-se uso de uma balança eletrônica marca Shimadzu modelo AY220, a qual tem resolução de 0,0001 g. Através da relação com a densidade do material, obteve-se o desgaste volumétrico (Equação 4.2).

$$A_{vol} = \frac{\Delta m}{\rho} 1000 \quad (4.2)$$

onde A_{vol} refere-se a perda volumétrica da amostra [mm³], Δm é a variação da massa antes e depois do ensaio [g] e ρ é a densidade do material ensaiado [g/cm³].

A densidade do material foi determinada experimentalmente, através de uma relação entre a massa e o volume das amostras, medidos antes dos ensaios (Tabela 4.3).

Tabela 4.3 – Densidades utilizadas no cálculo do desgaste.

Classe	Densidade para 20% de fibras [g/cm ³]	Densidade para 40% de fibras [g/cm ³]
Sisal	1,14	1,12
Híbrido	1,28	1,37
Vidro	1,45	1,7

Não se mediu o desgaste do disco de aço SAE 1020 nos ensaios realizados no presente trabalho.

4.5 Obtenção das Imagens

Foram obtidas micrografias das amostras pós-ensaio, com aumentos de 25x e 50x, fazendo-se uso de um microscópio de bancada, marca Zeiss modelo Axio Lab.A1. Também, através de um estereoscópio de bancada, marca Zeiss modelo Stemi 508, foi registrada a condição superficial macroscópica das amostras antes e depois dos ensaios.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Desgaste dos Compósitos com 20% de Fibras em Volume

Os resultados médios de desgaste volumétrico, coeficiente de atrito e temperatura máxima atingidos pelos compósitos são apresentados na Figura 5.1.

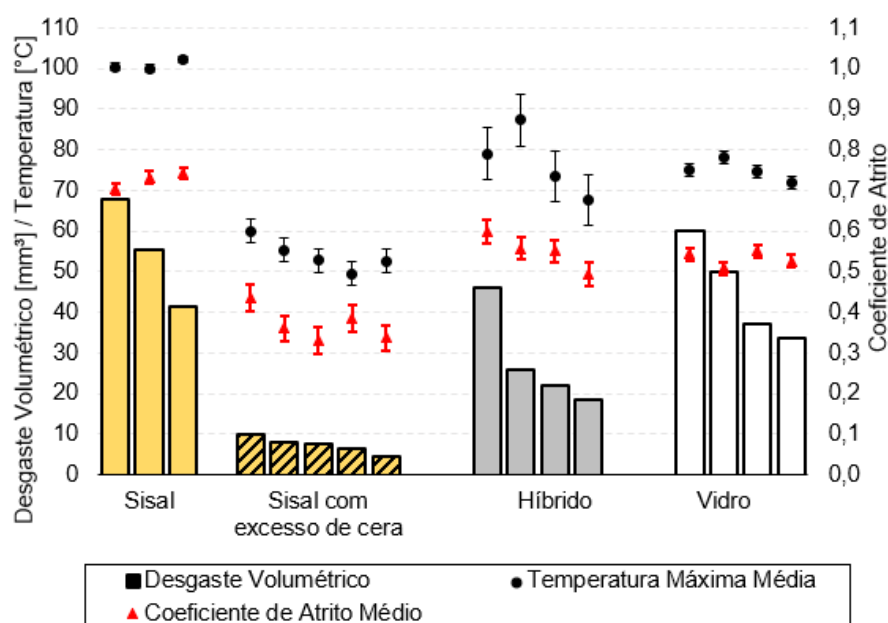


Figura 5.1 – Resultados médios de desgaste volumétrico, coeficiente de atrito e temperatura máxima para as amostras com 20% de fibras em volume.

As amostras que apresentaram os menores valores de desgaste, de coeficiente de atrito e de temperatura máxima foram as 5 amostras de sisal (hachuradas na Figura 5.1) com excesso de desmoldante (cera de carnaúba) na superfície. De acordo com Miranda, 2015, a cera de carnaúba é um composto duro, quebradiço e hidrofóbico. Uma provável explicação é que o excesso de cera tenha impedido o contato direto entre as fibras de sisal e o disco, funcionando como uma camada protetora e lubrificante. Isso acabou por aumentar a resistência ao desgaste dos compósitos, com excesso de desmoldante, ensaiados no presente estudo. A Figura 5.2 apresenta uma estereoscopia de duas amostras, a primeira (Figura 5.2 (a)) com pouco desmoldante na superfície e a segunda (Figura 5.2 (b)) com excesso de desmoldante. Os pontos de acúmulo de cera, sobrepostos as fibras de sisal, podem ser vistos no detalhe na Figura 5.2 (c).

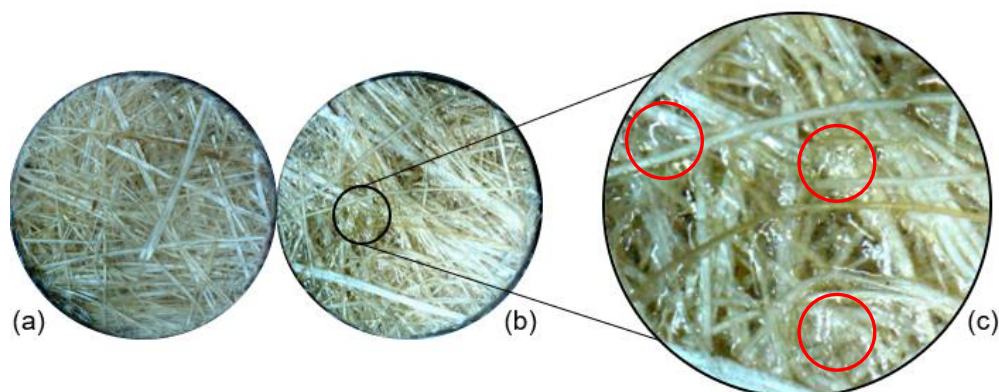


Figura 5.2 - Amostras de sisal (a) com pouca cera, (b) com excesso de cera e (c) detalhe dos acúmulos de cera sobre as fibras.

Para fins de comparação da média global de desgaste, foram desconsideradas as amostras de sisal com excesso de desmoldante. A Figura 5.3 ilustra os valores médios de desgaste e de coeficiente de atrito para as 3 classes de compósitos.

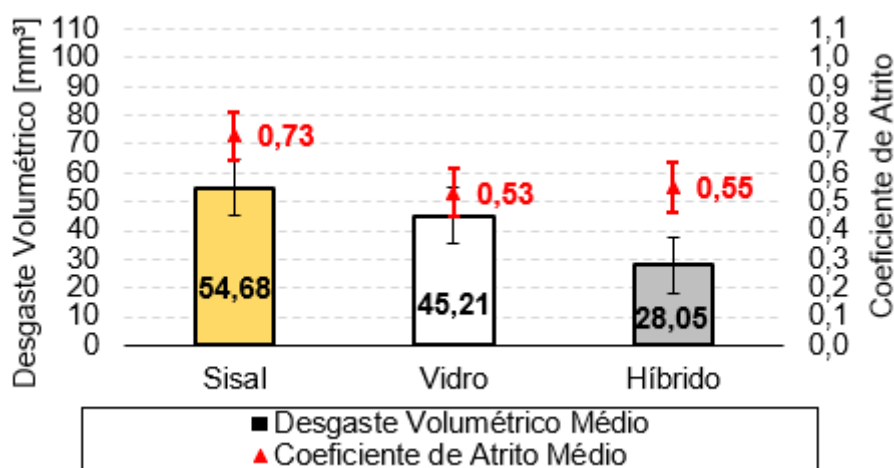


Figura 5.3 – Comparativo da média global de desgaste volumétrico e coeficiente de atrito das amostras com 20% de fibras em volume.

O compósito híbrido teve o melhor resultado, apresentando o menor desgaste volumétrico médio. Esse menor desgaste pode ser explicado pela forma como as fibras de vidro ficaram retidas nas fibras de sisal (Figura 5.4). Essa sinergia entre as fibras dificultou o arrancamento das fibras de sisal, o que diminuiu significativamente o desgaste. Também, o sisal evitou que as fibras de vidro se deslocassem pela matriz, impedindo que as mesmas se desprendessem do compósito. Esse comportamento é comum a todas as amostras do compósito híbrido.

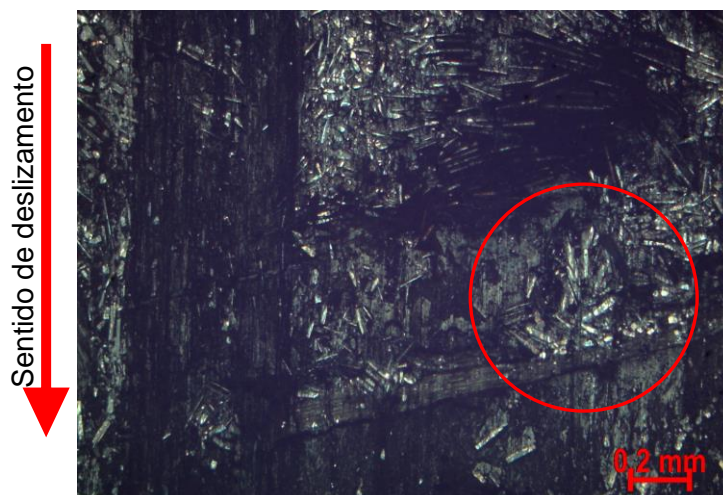


Figura 5.4 – Em detalhe, fibras de vidro retidas nas fibras de sisal em uma amostra híbrida. A seta indica a direção do deslizamento.

Os compósitos de sisal apresentaram os maiores valores médios de desgaste e de coeficiente de atrito entre os compósitos comparados nesse estudo. O desprendimento de fragmentos, e até mesmo de fibras inteiras de sisal, devido à baixa adesão entre fibra e matriz, proporcionou um alto coeficiente de atrito, levando o compósito a atingir altas temperaturas (acima dos 100°C). Isso pode ter ocasionado um amolecimento da matriz de poliéster, o que possibilitou maior liberdade de movimento para as fibras de sisal. Assim, deu-se um maior contato superficial entre pino e disco, resultando em maior arrancamento de fibras de sisal e em um alto valor de desgaste. A Figura 5.5 ilustra uma amostra de sisal antes e durante o ensaio.

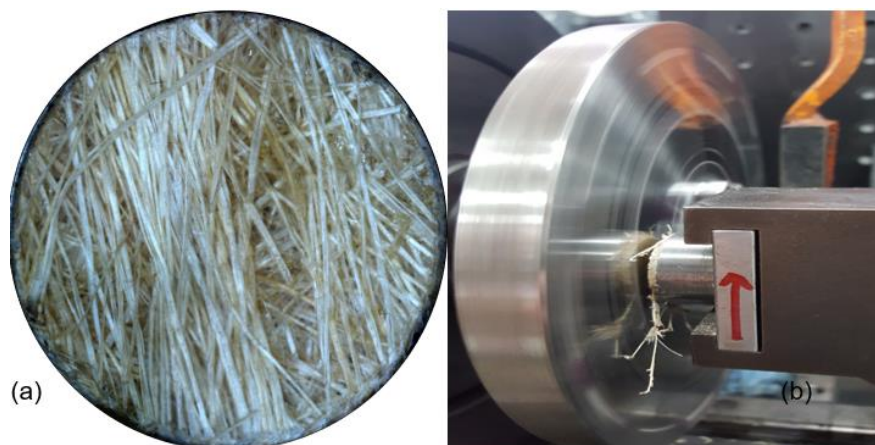


Figura 5.5 – (a) Superfície da amostra de sisal que apresentou maior desgaste e (b) arrancamento das fibras de sisal na amostra.

O Apêndice A apresenta imagens estereoscópicas da superfície de seis amostras, uma de cada classe de compósito, para 20% e 40% de fibras em volume, antes e após o ensaio. Algumas amostras apresentaram uma deposição de material sobre a superfície após o ensaio, no entanto, esse parâmetro não foi avaliado no presente trabalho.

5.2 Desgaste dos Compósitos com 40% de Fibras em Volume

Os resultados médios de desgaste volumétrico, coeficiente de atrito e temperatura máxima são ilustrados na Figura 5.6.

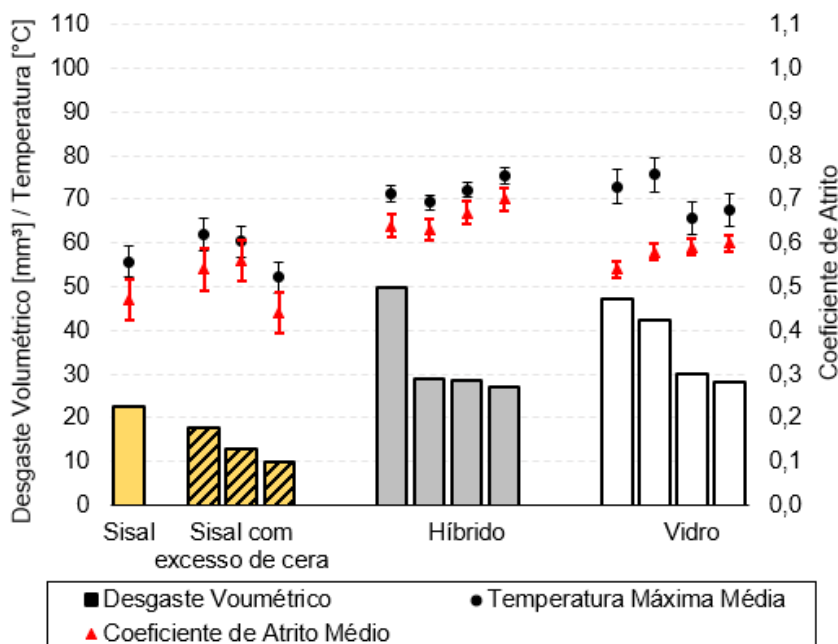


Figura 5.6 – Resultados médios de desgaste volumétrico, coeficiente de atrito e temperatura máxima para as amostras com 40% de fibras em volume.

A microscopia pós ensaio revelou que as 3 amostras do compósito de sisal com menor desgaste apresentaram excesso de cera na superfície. Da mesma maneira como nas amostras com 20% de fibras em volume, a cera de carnaúba afetou o desempenho tribológico desses compósitos. O Apêndice B apresenta a micrografia de uma amostra de sisal com 40 % de fibras em volume e excesso de desmoldante.

Assim, para o comparativo global entre o desgaste médio de cada classe, foi considerada apenas a amostra de sisal com pouca cera de carnaúba na superfície. A Figura 5.7 apresenta os valores médios de desgaste e de coeficiente de atrito para as 3 classes de compósitos.

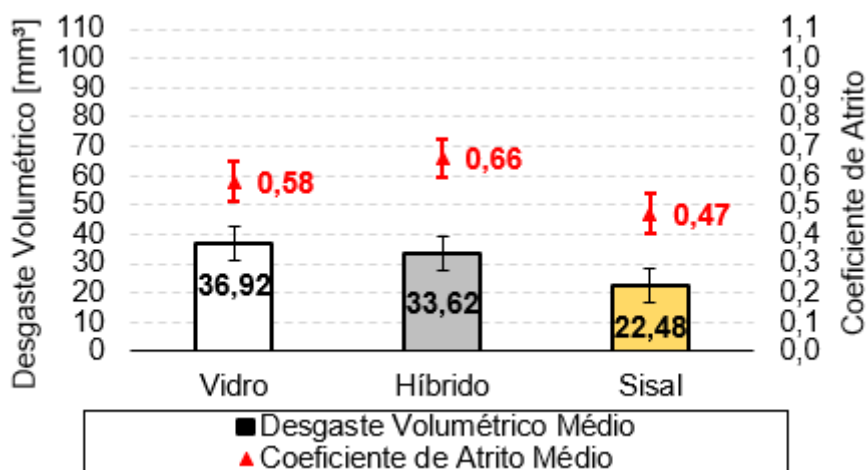


Figura 5.7 – Comparativo da média global de desgaste volumétrico e coeficiente de atrito das amostras com 40% de fibras em volume.

O menor desgaste médio para os compósitos com conteúdo de 40% foi o da amostra de sisal puro. Este efeito (aumento da resistência ao desgaste devido ao aumento do conteúdo de fibras de sisal) é consistente com o reportado pela literatura, como em Chand e Dwivedi, 2008. A maior quantidade de fibras de sisal: (i) dificulta o arrancamento de fibras inteiras, as quais são cortadas (Figura 5.8), ao invés de arrancadas; (ii) aumenta as descontinuidades na matriz, como também foi observado por Chand e Dwivedi, 2008. Essa combinação acarreta em um

menor coeficiente de atrito e reduz o efeito do amolecimento da matriz (possível agravador de desgaste). A melhor distribuição das tensões na superfície do compósito, consequência do maior número de fibras, também pode favorecer a maior resistência ao desgaste.

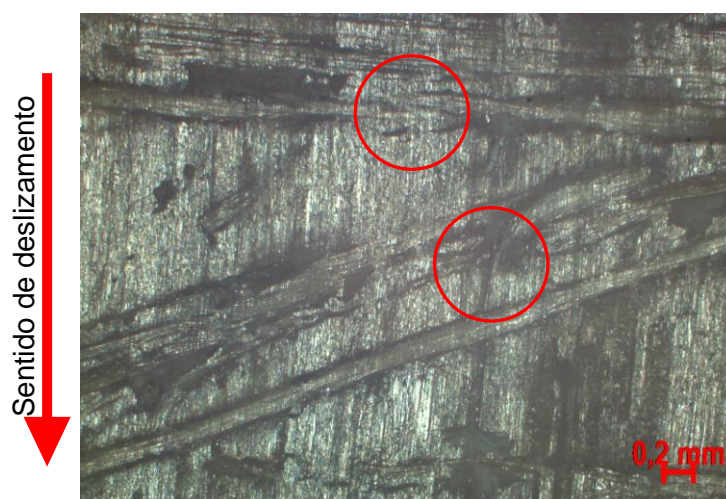


Figura 5.8 – Amostra de sisal (40% de fibras em volume) com fibras cortadas, em detalhe. A seta indica a direção do deslizamento.

Uma vez mais o compósito híbrido apresentou um desgaste menor que o compósito de fibra de vidro. Se repete aqui a influência das fibras de sisal retendo as fibras de vidro, conforme imagem no Apêndice B do presente trabalho.

5.3 Comparativo Entre os Compósitos com 20% e 40% de Fibras em Volume

A Figura 5.9 apresenta um comparativo entre as médias de desgaste e do coeficiente de atrito das amostras de compósitos com 20% e 40% de fibras em volume. Uma vez mais para o compósito de sisal foram consideradas nesta análise apenas as amostras com pouco desmoldante na superfície.

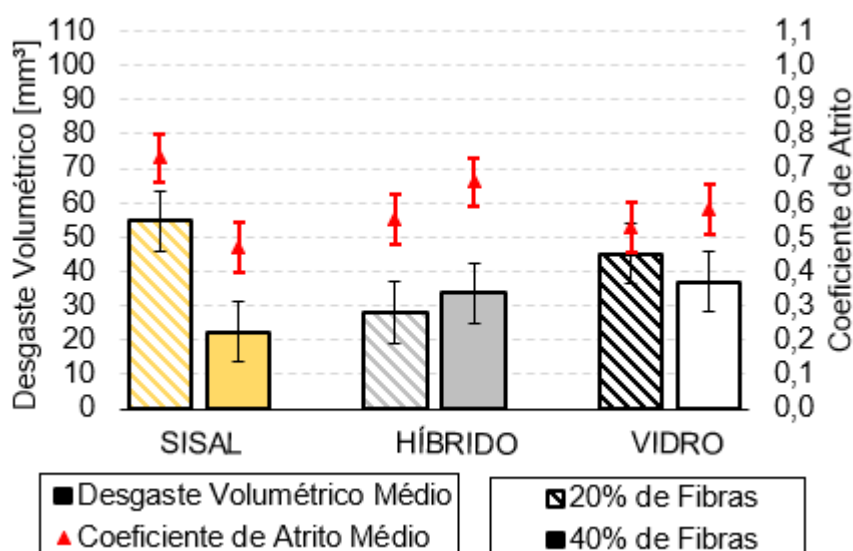


Figura 5.9 – Comparativo das médias do desgaste volumétrico e do coeficiente de atrito entre os compósitos com 20% e 40% de fibras em volume, para o compósito de sisal, compósito híbrido e compósito de vidro, respectivamente.

Em geral, com o aumento do conteúdo de fibras, de 20% para 40%, os compósitos apresentaram uma diminuição no desgaste volumétrico (casos do compósito de fibras de sisal e do compósito de fibras de vidro). O comparativo para o compósito de fibra de sisal revelou uma redução no desgaste volumétrico com o aumento do conteúdo de fibras, como mencionado na seção 5.2, e o mesmo comportamento foi observado no compósito de fibra de vidro. Em contrapartida, o compósito híbrido apresentou um aumento no desgaste volumétrico. Estabelecer os fatores que levaram a esse aumento demandaria uma análise mais aprofundada de alguns parâmetros pós ensaio, como o filme depositado sobre a contraparte ao longo do deslizamento do pino sobre o disco. No entanto esse aspecto não foi abordado no presente trabalho.

6. CONCLUSÕES

No estudo realizado os resultados indicaram que o compósito de fibra de sisal com 40% de fibras em volume apresentou o menor desgaste volumétrico médio entre todas as classes de compósitos ensaiadas. Esse resultado mostrou relação com o maior conteúdo de fibras, visto que os compósitos de sisal com 20% de fibras em volume apresentaram o maior valor de desgaste volumétrico médio entre todas as classes ensaiadas. Características de superfície e fração volumétrica influenciaram no desempenho tribológico dos compósitos. É necessário cuidado e controle na confecção dos compósitos, pois pequenos detalhes do processo que visam auxiliar na fabricação (como o uso de desmoldante) podem e vão influenciar o comportamento tribológico do compósito em condições de trabalho.

Para os dois cenários de conteúdos de fibras avaliados nesse estudo, 20% e 40%, o compósito híbrido mostrou resultados melhores que os do compósito de fibra de vidro, indicando que a adição de fibras de sisal foi benéfica para o desempenho tribológico do compósito, proporcionando menor desgaste volumétrico e maior coeficiente de atrito do que os apresentados pelo compósito de fibra de vidro.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

American Society for Testing and Materials; **“ASTM D3878: Standard Terminology for Composite Materials”**, 2016.

American Society for Testing and Materials; **“ASTM G99: Standard Test Method for Wear Testing with a Pin-on-Disc Apparatus”**, 2004.

Chand M.; Fahim N.; **“Tribology of natural fiber polymer composites”**, Woodhead Publishing Elsevier; 2008.

Chand, N.; Dwivedi, U.; **“Influence of Fiber Orientation on High Stress Wear Behavior of Sisal Fiber-Reinforced Epoxy Composites”**, 2007.

Chand, N.; Dwivedi, U.; **“Sliding Wear and Friction Characteristics of Sisal Fibre Reinforced Polyester Composites: Effect of Silane Coupling Agent and Applied Load”**, 2008.

Companhia do Sisal do Brasil, **“Matéria-prima”**, <https://www.cosibra.com.br>. Acessado em: 17/12/2018.

Cordeiro, R. C.; **“Plasma Treatment of Natural Fibers to Improve Fiber-Matrix Compatibility”**, 2016.

Filho, S. L. M. R.; Oliveira, P. R.; Vieira, L. M. G.; Panzera, T. H.; **“Hybrid bio-composites reinforced with sisal-glass fibres and Portland cement particles: A statistical approach”**, 2018.

Garcia, A.; Spim, J. A.; Santos, C. A.; **“Ensaio dos Materiais”**. LTC, 2012.

Gurunathan, T.; Mohanty, S.; Nayak, S. K.; **“A review of the recent developments in biocomposites based on natural fibres and their application perspectives”**, 2016.

Lee K.; Blau P. J.; Truhan Jr. J. J.; **“Effects of moisture adsorption on laboratory wear measurements of brake friction materials”**, 2007.

Li, X.; Tabil, L. G.; Panigrahi, S.; **“Chemical Treatments of Natural Fiber for Use in Natural Fiber-Reinforced Composites: A Review”**, 2007.

Milanese, A. C.; **“Caracterização de compósitos de Matrizes Poliméricas Reforçadas com Fibra de Sisal e de Vidro”**, 2008.

Miranda, M.; **“Revestimento Nanoestruturado de Cera de Carnaúba na Manutenção da Qualidade Pós- Colheita de Tomates”**, 2015.

Neis, P. D.; **“Projeto e Construção de Um Tribômetro Para Estudos Relacionados a Materiais de Fricção Veiculares”**, 2008.

Neis, P. D.; Ferreira, N. F.; Silva, F. P.; **“Comparison Between Methods for Measuring Wear in Brake Friction Materials”**, 2014.

Omrani, E.; Menezes, P.L.; Rohatgi, P.K.; **“State of the art on tribological behavior of polymer matrix composites reinforced with natural fibers in the green materials world”**, 2016.

Pavlak, R. P.; Neis, P. D.; Poletto, J. C.; de Barros, L. Y.; Ferreira, N. F.; **“Wear, Friction and NVH Characterization Using a Laboratory-Scale Tribometer”**, 2017.

Senthilkumar, k.; Saba, N.; Rajini, N.; Chandrasekar, M.; Jawaid, M.; Siengchin, S.; Alotman, O. Y.; **“Mechanical Properties Evaluation of Sisal Fibre Reinforced Polymer Composites: A Review”**, 2018.

SISALL, **“O sisal”**, <http://www.sisall.com.br>. Acessado em: 18/10/2018.

Tharmaraj, P.; Irulappasamy, S.; Manoharan, T.; J T, W.; Amico, S. C.; **“Basalt Hybrid effects on the Wear and Friction of Intra-Layer Curaua/Polyester Composites”**, 2016.

Wambua, P.; Ivens, J.; Verpoest, I.; **“Natural Fibres: Can They Replace Glass in Fibre Reinforced Plastics?”**, 2003.

Xin, X.; Xu, C. G.; Qing, L. F.; **“Friction Properties of Sisal Fibre Reinforced Resin Brake Composites”**, 2007.

ANEXO A – INCERTEZAS

A.1 Incerteza do Torque e da Força Normal

Através da combinação das incertezas individuais dos dispositivos envolvidos nestas grandezas, obtém-se um valor de incerteza para torque e força normal de $\pm 0,036$ Nm e $\pm 12,75$ N, respectivamente, com intervalo de confiança de 95%.

A.2 Incerteza do Raio de Deslizamento

O ajuste do raio de deslizamento é realizado através de um fuso e manivela. A leitura é feita através de um paquímetro digital. Segundo o fabricante, a repetitividade deste equipamento é de ± 10 μ m. Para uma análise conservativa, Neis, 2012, considerou uma incerteza de medição de ± 17.8 μ m, valor este encontrado em paquímetros mecânicos.

A.3 Incerteza do Coeficiente de Atrito

Para o cálculo da incerteza do coeficiente de atrito foi utilizada uma relação que combina todas as grandezas envolvidas. Esta relação é aplicada para determinar a incerteza combinada quando estão envolvidas grandezas dependentes e independentes ao mesmo tempo. A incerteza combinada das medições de atrito é menor ou igual a $\pm 1\%$, considerando a faixa operacional utilizada nos ensaios deste trabalho. [Pavlak et al., 2017].

A.4 Incerteza do Termopar

Os experimentos foram realizados utilizando um termopar tipo K, instalado no interior do disco de freio. A incerteza desta grandeza é determinada através da Equação A.1, na qual combina as incertezas individuais do termopar, condicionador de sinal e sistema de aquisição de dados.

$$U(TK) = \sqrt{u^2(k) + u^2(ck) + u^2(sa)} \quad (A.1)$$

Onde $U(TK)$ é a incerteza de medição combinada [$^{\circ}$ C], $u(k)$ é a incerteza do termopar tipo K [$^{\circ}$ C], $u(ck)$ é a incerteza do condicionador de sinal [$^{\circ}$ C] e $u(sa)$ é a incerteza associada à capacidade de resolução do sistema de aquisição de dados [$^{\circ}$ C] [Neis, 2012].

Para os valores de temperatura encontrados neste experimento, tem-se uma incerteza de $\pm 2,38$ $^{\circ}$ C, com um intervalo de confiança de 95%.

APÊNDICE A – Imagens das amostras obtidas por estereoscopia

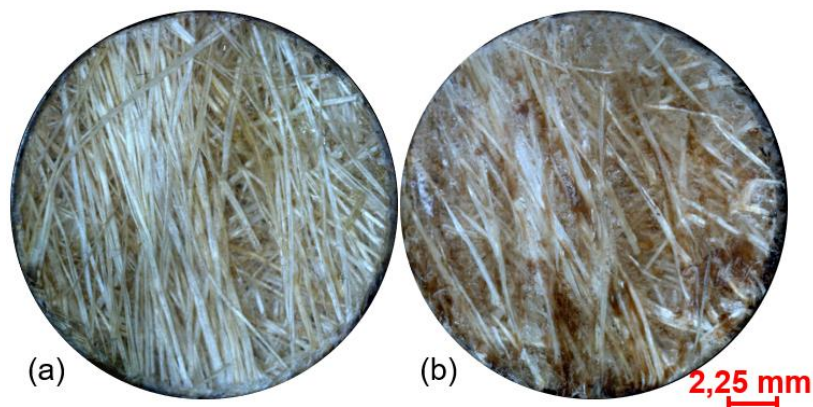


Figura A.1 – Superfície da amostra de fibra de sisal, com 20% de fibras em volume, (a) antes e (b) após o ensaio.

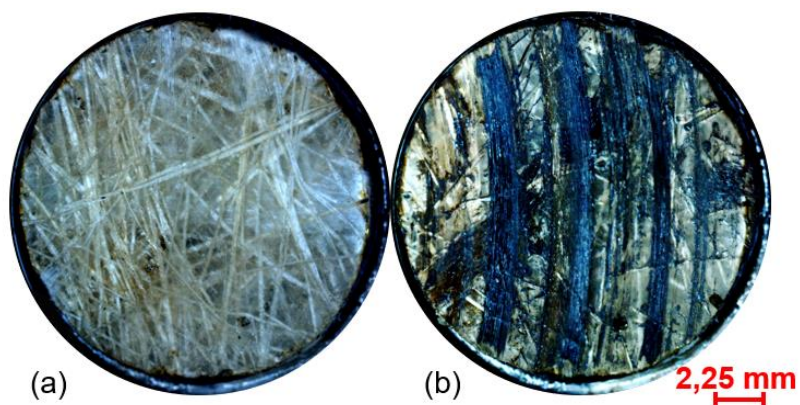


Figura A.2 – Superfície da amostra híbrida, com 20% de fibras em volume, (a) antes e (b) após o ensaio.

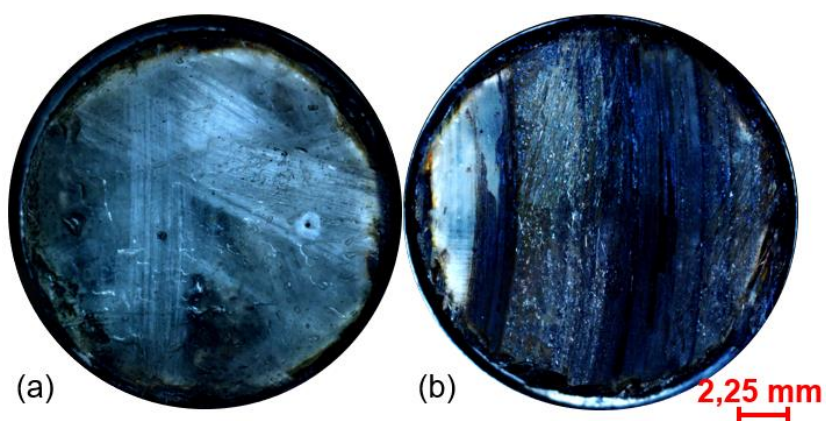


Figura A.3 – Superfície da amostra de fibra de vidro, com 20% de fibras em volume, (a) antes e (b) após o ensaio.

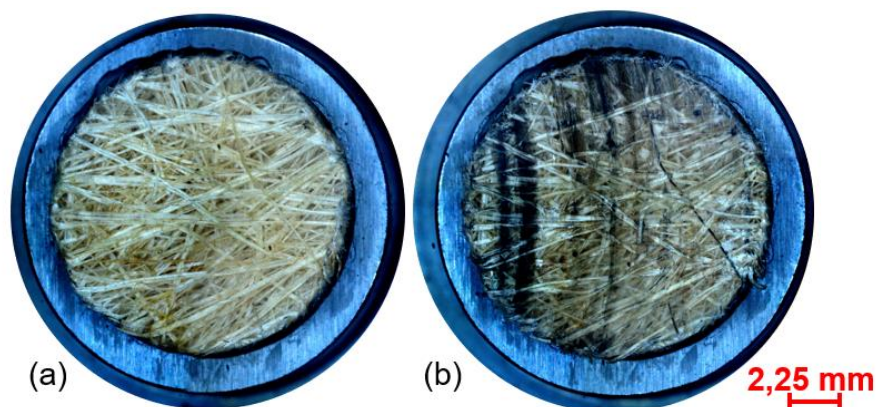


Figura A.4 – Superfície da amostra de fibra de sisal, com 40% de fibras em volume, (a) antes e (b) após o ensaio.

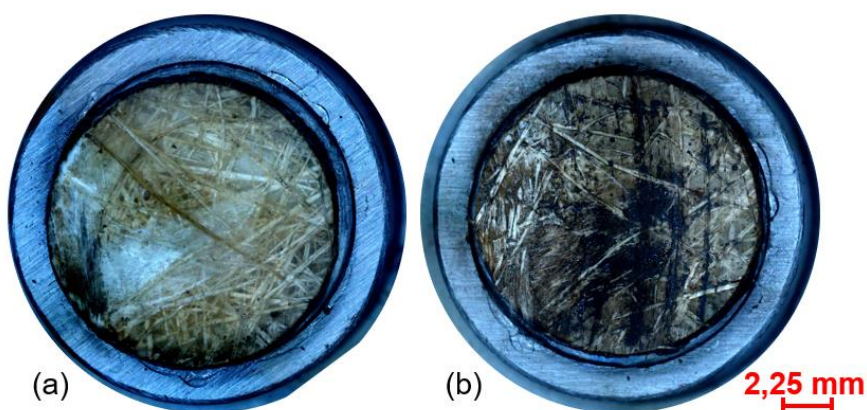


Figura A.5 – Superfície da amostra híbrida, com 40% de fibras em volume, (a) antes e (b) após o ensaio.

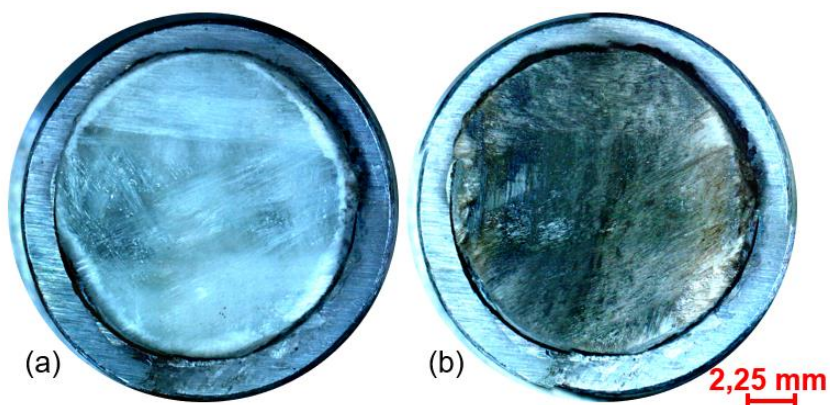


Figura A.6 – Superfície da amostra de fibra de vidro, com 40% de fibras em volume, (a) antes e (b) após o ensaio.

APÊNDICE B – Micrografias das amostras

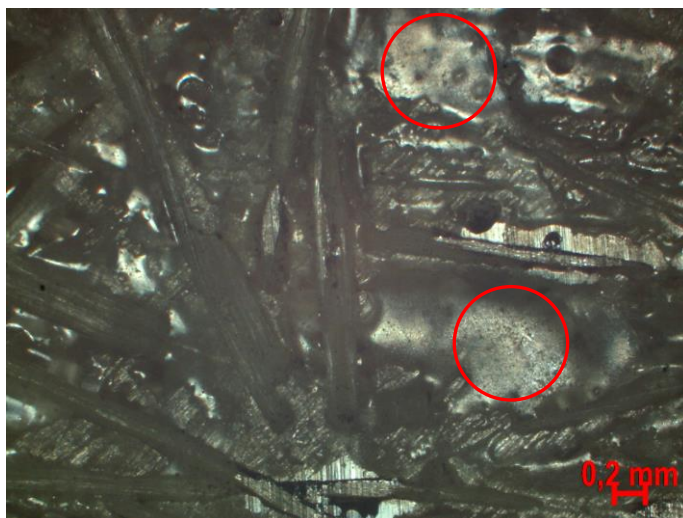


Figura B.1 – Amostra de fibra de sisal, com 40% de fibras em volume, mostrando resíduos de cera, em detalhe, presentes entre as fibras.

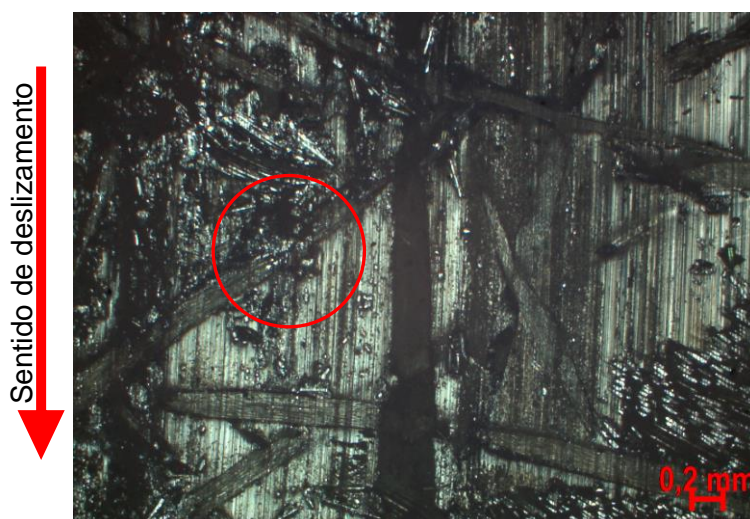


Figura B.2 – Amostra híbrida, com 40% de fibras em volume, caracterizada pelas fibras de vidro retidas nas fibras de sisal, como destacado. A seta indica a direção do deslizamento.